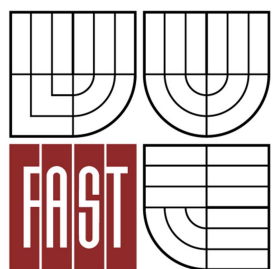




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

AKUSTIKA HUDEBNÍHO KLUBU

AKUSTIC OF THE MUSICAL CLUB

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. MIROSLAV DOSTÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAGMAR DONAŤÁKOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Miroslav Dostál
Název	Akustika hudebního klubu
Vedoucí diplomové práce	Ing. Dagmar Donatřáková
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

.....
prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Studie dispozičního řešení stavby, katalogy a odborná literatura, Stavební zákon v platném znění, Prováděcí vyhlášky stavebního zákona v platném znění, Vyhláška 398/2009 Sb., platné ČSN, kopie dokumentace stávajícího stavu budovy, kopie katastrální mapy. Protokol z měření doby dozvuku stávajícího uzavřeného prostoru.

Zásady pro vypracování

Zadání VŠKP: Návrh řešení rekonstrukce hudebního klubu z hlediska prostorové akustiky vlastního sálu zpracovaný v rozsahu výpočtového modelu v oblasti akustiky, volby vhodných materiálů a výrobků a zpracování části realizační dokumentace návrhu akustických úprav.

Cíl práce: na základě výpočtového modelu provést optimální návrh a řešení prostoru sálu pro daný účel využívání z hlediska prostorové akustiky, návrh vhodné materiálové a konstrukční soustavy, jejího umístění a vypracování části výkresové dokumentace realizace navržených úprav podle pokynů vedoucího práce. Textová i výkresová část bude zpracována s využitím výpočetní techniky (v textovém a grafickém editoru). Výkresy budou opatřeny jednotným popisovým polem a k obhajobě budou předloženy složené do desek z tvrdého papíru potažených černým plátnem s předepsaným popisem se zlatým písmem. Dílčí složky formátu A4 budou opatřeny popisovým polem s uvedením seznamu příloh na vnitřní straně složky.

Požadované výstupy dle uvedené Směrnice:

Textová část VŠKP bude obsahovat kromě ostatních položek také položku h) Úvod (popis námětu na zadání VŠKP), položku i) Vlastní text práce a položku j) Závěr (zhodnocení obsahu VŠKP, soulad se zadáním, změny oproti původní studii).

Příloha textové části VŠKP v případě, že diplomovou práci tvoří také konstruktivní projekt bude obsahovat výkresy pro provedení stavby (situace širších vztahů, půdorysy řešených úrovní objektu, svislé řezy, detaily, specifikace – rozsah určí vedoucí práce), zprávu požární bezpečnosti, stavebně fyzikální posouzení stavebních konstrukcí včetně zadané specializované části. O zpracování specializované části bude rozhodnuto vedoucím DP v průběhu práce studenta na zadaném tématu.

.....

Ing. Dagmar Donat'áková
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou prostorové akustiky uzavřených prostor. V rámci této práce bylo provedeno měření, 3D modelování a následný návrh akustických úprav olomouckého hudebního klubu Metro. K výpočtům byl použit specializovaný software (Odeon Room Acoustics Program).

Výsledkem práce je návrh vhodných stavebně-akustických úprav, s nimiž bude docílena optimální doba dozvuku, ve snaze zlepšit fyzikální parametry objektu.

Klíčová slova

Prostorová akustika, doba dozvuku, rekonstrukce, Olomouc, Metro chillout club

Abstract

This master's thesis deals with the problems of interior acoustics. Within the scope of the thesis measurements were taken, followed by 3D modeling and subsequent design modifications of Olomouc acoustic music club Metro. The calculations used a specialized software (Odeon Room Acoustics Program).

The result of the work is a proposal of suitable reconstruction and acoustic treatment, which will be achieved by optimization of reverberation time, in an effort to improve the physical properties of the object.

Keywords

Room acoustics, reverberation time, reconstruction, Olomouc, Metro chillout club

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Miroslav Dostál *Akustika hudebního klubu*. Brno, 2014. XX s., YY s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. Dagmar Donáťáková.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.1.2014

.....
podpis autora
Bc. Miroslav Dostál

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí této diplomové práce Ing. Dagmar Donat'ákové za odborné vedení, ochotu, trpělivost a cenné rady poskytnuté v průběhu zpracování práce. Dále bych rád poděkoval rodičům za podporu, kterou mi v průběhu celého studia poskytovali.

OBSAH

1. Úvod	8
2. Prostorová akustika	10
2.1 Základní pojmy a veličiny charakterizující zvuk a jeho šíření	11
2.1.1 Pojmy prostorové akustiky	11
2.1.2 Pojmy fyzikální akustiky	13
3. Výpočetní postupy v prostorové akustice	17
3.1 Vlnová teorie	18
3.2 Statistická teorie	20
3.3 Geometrická teorie	23
3.4 Simulační metody v prostorové akustice	25
4. Materiály a konstrukce používané v prostorové akustice	28
4.1 Porézní materiály	29
4.2 Kmitající desky a membrány	31
4.3 Dutinové rezonátory	33
4.4 Rozptylové prvky	36
4.4.1 Klasické rozptylové prvky	36
4.4.2 Difúzní prvek RPG	38
5. Legislativní požadavky	42
5.1 Základní kritéria pro uzavřené prostory	43
5.2 Akustické parametry materiálů pro aplikaci v prostorové akustice	49
6. Charakteristika počítaného prostoru, cíl výpočtu	51
6.1 Popis uvažovaného prostoru	52
6.2 Měření doby dozvuku	54
6.3 Legislativní požadavky	56
6.4 Naměřené hodnoty	56

7. Modelování zvukových zdrojů	58
7.1 Výstupy z programu Odeon	59
7.2 Návrh akustických úprav	63
7.3 Zhodnocení akustických úprav	64
8. Závěr	67
9. Seznam příloh	69
10. Seznam použitých symbolů a zkratek	71
11. Seznam použité literatury	73

1. ÚVOD

Akustika je vědecká disciplína zabývající se studiem mechanického kmitání a jeho šířením v pružném prostředí. Základní principy jsou odvozeny z teoretické fyziky. [1]

Akustiku jako technický obor lze dle náplně řešené problematiky rozdělit na:

- urbanistickou
- stavební
- prostorovou

Urbanistická akustika se zabývá studiem akustických jevů ve venkovním prostoru z hlediska ochrany před hlukem. [1]

Stavební akustika je předmět, který se zabývá studiem akustických jevů v budovách a jejich okolí s přihlédnutím k vlivu stavebních konstrukcí a prvků. [1]

Prostorová akustika se zabývá studiem akustických jevů uvnitř uzavřených, případně i ne zcela uzavřených prostorů, z hlediska dobré slyšitelnosti a srozumitelnosti přenášeného zvuku. Ke sledování podmínek optimální akustičnosti prostoru aplikuje metody geometrické a statistické teorie. V některých zvláštních případech lze použít k řešení vlnové rovnice za daných okrajových podmínek. [1]

Rozdělení akustiky do dílčích částí je však pouze ideové, neboť se vzájemně v mnoha případech překrývají a neexistují přesná ohraničení. Navíc je třeba podotknout, že zásadní fyzikální principy platí obecně pro celou akustiku. [1]

Tato práce se zaměřuje na prostorovou akustiku a její využití v praxi. Jejím cílem je zlepšení akustických vlastností a parametrů stávajícího hudebního klubu *Metro chillout club* v Olomouci za účelem zlepšení poslechové kvality v jeho prostorách. V rámci předložené diplomové práce bylo ve spolupráci s vedoucí diplomové práce provedeno měření zmiňovaných prostor. Následně byl zpracován jejich 3D model a výpočet sledovaných hodnot ve specializovaném programu *Odeon Room Acoustics Program*, s jehož pomocí byl vypracován návrh vhodných interiérových úprav z hlediska akustické pohody uvnitř objekt. Návrh úprav a opatření je v souladu s platnou legislativou a právními předpisy.

2. PROSTOROVÁ AKUSTIKA

Jednou z nejnáročnějších disciplín patřících k vědnímu oboru stavební akustiky, zabývající se řešením tvaru a interiéru prostoru, je *prostorová akustika*. Metody návrhu tvaru a materiálového ošetření stěn posuzovaných prostor jsou náročné jak z hlediska početně-grafického, tak i architektonicko-dispozičního. Vstupní parametry vycházejí ze základních principů a zákonů klasické fyziky (akustika). Geometrická akustika vychází z geometrie. Vlastní výpočet pak zahrnuje jednak fyzikální vlastnosti aplikovaných materiálů a jednak požadavky kladené na zabezpečení akustické pohody ve všech dimenzích, tj. dobrá srozumitelnost, slyšitelnost a difuzita těchto parametrů v celé požadované ploše posuzovaného prostoru. [1]

2.1. Základní pojmy a veličiny charakterizující zvuk a jeho šíření

2.1.1. Pojmy prostorové akustiky

Prostorová akustika je pod-obor akustiky zabývající se šířením zvuku uvnitř zcela nebo částečně uzavřeném prostoru. [2]

Akustika prostoru je souhrn akustických vlastností a parametrů místnosti určujících poslechovou kvalitu mluveného slova, nebo hudby. [2]

Uzavřený prostor je prostor ohraničený plochami, které tvoří „obálku“ místnosti/prostoru a vykazují určité akustické vlastnosti. [3]

Akustiku prostoru lze popsat hned několika rozlišnými akustickými vlastnostmi, z nichž každá je relevantní určitému subjektivnímu atributu poslechové kvality hudby a mluveného slova. [7]

Doba dozvuku T patří mezi základní sledované veličiny. Jedná se o objektivní kritérium definované jako čas v sekundách potřebný pro pokles hladiny akustického tlaku o 60 dB po vypnutí zdroje. Získá se lineárním proložením dozvukového poklesu v úseku od -5 dB do -35 dB (T_{30}) nebo od -5 dB do -25 dB (T_{20}). Při návrhu se hodnota počítá z příslušných výpočetních vztahů. [3]

Optimální doba dozvuku T_0 je hodnota v sekundách doporučovaná pro dobu dozvuku T podle účelu místnosti a její velikosti a dosažení podobných hodnot je základním předpokladem pro dosažení požadovaných poslechových kvalit uzavřeného prostoru. [3]

Zvuková pohltivost je definována jako schopnost určité látky, nebo materiálu absorbovat část akustické energie dopadající na jeho povrch přeměnou na tepelnou energii. [3]

Činitel zvukové pohltivosti α je bezrozměrný součinitel vyjadřující podíl pohlcené akustické energie k celkové akustické energii dopadající na rozhraní prostředí (povrch materiálu).

Pokud nabývá hodnot 1,00 pak se jedná o látku 100% pohltivou a naopak při hodnotách 0,00 se jedná o látku plně odrazivou. [3]

Ekvivalentní pohltivá plocha A je odpovídající plocha v m^2 plně pohltivého materiálu pro posuzovaný materiál o ploše S v m^2 . Jedná se o součin plochy materiálu S a činitele zvukové pohltivosti α . [4]

$$A = \alpha \cdot S \quad (m^2) \quad (1.1)$$

Zvukový paprsek je reprezentací velmi malé výseče z kulové akustické vlny šířící se od jejího zdroje všemi směry a slouží jako názorná reprezentace šíření zvuku od jejího zdroje všemi směry a slouží jako názorná reprezentace šíření zvuku od jeho zdroje podle pravidel geometrické akustiky. [3]

Jasnost je veličina vyjadřující úroveň poslechové kvality hudby v uzavřeném prostoru a reprezentuje rozlišitelnost jednotlivých tónů při rychlých hudebních pasážích. [1]

Zřetelnost je veličina vyjadřující úroveň poslechové kvality mluveného slova v uzavřeném prostoru a charakterizuje rozlišitelnost jazykových prvků plynulé řeči v čase. Jedná se tedy o srozumitelnost lidské řeči. [3]

Srozumitelnost je poměr prvků řeči (slabiky, celá slova nebo části vět) zaslechnutých správně k celkovému počtu vysílaných prvků řeči. [3]

Křivka poklesu je grafické zobrazení poklesu hladiny akustického tlaku po vypnutí zdroje. [5]

Metoda přerušného šumu slouží k získání křivek poklesu přímým záznamem poklesu hladin akustického tlaku po vybuzení širokopásmovým nebo pásmovým šumem. [6]

Metoda integrované impulsové odezvy slouží k získání křivek poklesu integrací kvádrů impulsových odezev pozpátku. [6]

Impulsová odezva vyjadřuje časovou závislost akustického tlaku v místě příjmu po jeho vybuzení Diracovou delta funkcí. [6]

Neobsazený stav je takový stav, kdy se v sálu nevyskytují žádné osoby (účinkující, obecenstvo). U koncertních a operních sálů je tento stav uvažován i včetně židlí pro účinkující, notových pultů, bicích nástrojů apod. [5]

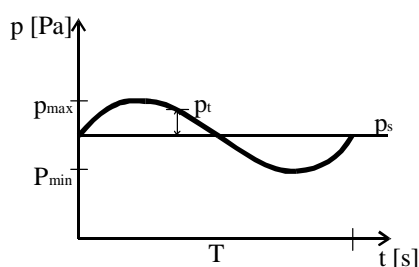
Studiový stav je takový stav, kdy je sál obsazen pouze řečníky, účinkujícími a nezbytnými osobami jako technici apod. avšak bez diváků. Jedná se o stav, který je běžný například při zkouškách nebo záznamech zvuku. [5]

Obsazený stav je takový stav, kdy je sál obsazen z 80% až 100%. Běžně se při výpočtu uvažuje obsazení ze 2/3. [5]

2.1.2. Pojmy fyzikální akustiky

Akustický tlak je jednou z nejdůležitějších veličin užívanou pro vyjádření „síly“ zvuku. Sluchový orgán člověka může přijímat zvuk z jakéhokoli směru, vnímá tedy akustický tlak (nikoli intenzitu zvuku), který lze nejjednodušší měřit. V praxi proto akustickým tlakem nahrazujeme důležitou dimenzi zvuku, intenzitu. [2]

Akustický tlak p ($\text{N/m}^2 = \text{Pa}$) je skalár a vyjadřuje rozdíl mezi barometrickou hodnotou tlaku vzduchu, měnící se zvolna v závislosti na atmosférických podmínkách, a okamžitou hodnotou tlaku při akustickém ději. [2]



Obr. 1 Celkový atmosférický tlak p , akustický tlak p_t a statický tlak p_s [2]

Akustická rychlost vyjadřuje rychlost kmitání částic prostředí (vzduchu) kolem klidové polohy při akustickém vlnění. Při volném postupném vlnění je poměr mezi akustickým tlakem p a akustickou rychlostí v stálý a závisí na konstantách prostředí podle vztahu [8]:

$$\frac{p}{v} = \text{konst.} = \rho_0 \cdot c \quad (s) \quad (1.2)$$

kde ρ_0 je hustota prostředí v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
 c rychlost šíření zvuku v prostředí v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 v akustická rychlost v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 p akustický tlak v $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$. [8]

Rychlost šíření zvuku c vyznačuje, jak daleko dospěje zvukový rozruch od místa pozorování za 1 s ve směru šíření zvuku. Závisí na materiálových vlastnostech a teplotě. Pro plyny i jiné materiály je tedy charakteristickou konstantou, která se mírně mění v závislosti na teplotě daného prostředí. Pro vzduch se při teplotě 20°C uvažuje rychlost zvuku $c = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při jiných teplotách je rychlost dána podle vztahu [8]:

$$c = 331,8 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{T_0}} = 331,8 + 0,6 \cdot t \quad (m.s^{-1}) \quad (1.3)$$

kde t je teplota vzduchu v $^{\circ}C$,

T_0 273,15 K. [2]

Vlnová délka λ je dráha, kterou proběhne vlna rychlostí c za dobu jedné periody T . Je charakteristickou veličinou pro vlnění. Platí pro ni vztah [2]:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (m) \quad (1.4)$$

kde c je rychlost šíření zvuku v prostředí v $m.s^{-1}$,

T doba jedné periody v s,

f frekvence vlnění (zvuku) v Hz. [2]

Intenzita zvuku I určuje povahu zvukové energie a akustický výkon zdroje zvuku. Je částí akustické energie, šířící se za 1 s postupnými akustickými vlnami plochou $1 m^2$, postavenou kolmo ke směru šíření zvuku. Platí pro ni vztah [8]:

$$I = p \cdot v = v^2 \cdot \rho_0 \cdot c \quad (W.m^{-2}) \quad (1.5)$$

kde c je rychlost šíření zvuku v prostředí v $m.s^{-1}$,

v akustická rychlost v $m.s^{-1}$,

p akustický tlak v $N.m^{-2}$,

ρ_0 hustota prostředí v $kg.m^{-3}$. [8]

Akustický výkon W udává míru přenosu akustické energie, která se přenáší při akustickém vlnění. Je to veličina periodicky závislá na čase, stejně jako akustický tlak nebo akustická rychlost. Výkon kmitavého děje v ustáleném stavu je definován jako práce vykonaná za jednotku času, kde práce je součinem síly a dráhy. Okamžitý výkon je pro diferenciálně malé časové úseky dán součinem působící síly F a akustické rychlosti kmitavého děje v [2]:

$$W = F \cdot v \quad (W) \quad (1.6)$$

kde F je působící síla v N,
 v akustická rychlost v m.s^{-1} . [8]

Hladiny zvuku

Na základě Weber-Fechnerova fyziologického zákona, který předpokládá, že smyslové vnímání člověka je úměrné logaritmu podnětu, se používá pro základní veličiny logaritmická míra, nazývaná hladina. Jejím rozměrem je *decibel* (dB). Početní operace s logaritmy vyžadují, abychom logaritmovali vždy bezrozměrné číslo. Z tohoto požadavku vyplývá i objasnění pojmu hladiny jako rozdílu, o který převyšuje logaritmická hodnota dané veličiny (p, I, W) logaritmus referenční hodnoty (p_o, I_o, W_o) vztažené ke kmitočtu 1 000 Hz. Obecně lze tedy hladinu definovat vztahem [2]:

$$L = \log \left(\frac{x}{x_o} \right) \quad (1.7)$$

kde x je hodnota určité veličiny,
 x_o referenční (srovnávací, dohodnutá) hodnota určité veličiny,
 L je hladina, jejíž jednotkou je bel (B). [2]

V praxi se používá pro vyjádření velikosti hladiny hodnota 10x menší než je bel, tj. decibel, a značí se (dB). Vztah pro vyjádření hladiny v (dB) má pak podobu [2]:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{x}{x_o} \right) \quad (1.8)$$

Logaritmická stupnice s jednotkou dB lépe vystihuje subjektivní sluchový vjem relativní hlasitosti. Lidský zdravý sluch může totiž zaznamenat nejmenší změnu zvuku o 1 dB. [2]

Hladina akustického výkonu L_W určuje akustický výkon vyzařovaný zdrojem zvuku, je tedy vlastností příslušného zdroje a je dána vztahem [2]:

$$L_W = 10 \cdot \log \left(\frac{W}{W_o} \right) = 10 \cdot \log W + 120 \quad (1.9)$$

a naopak

$$W = W_o \cdot 10^{L_W/10} \quad (1.10)$$

Hladina akustické intenzity L_I (dB) je definována vztahem [2]:

$$L_I = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (1.11)$$

a naopak

$$I = I_o \cdot 10^{L_I/10} \quad (1.12)$$

Hladina akustického tlaku L_p , kterou někdy značíme bez indexu p jako L , určuje akustický děj v kontrolním místě, resp. místě posluchače, je definována vztahem [2]:

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_o^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_o} \right) \quad (1.13)$$

a naopak

$$p = p_o \cdot 10^{L_p/20} \quad (1.14)$$

3. VÝPOČETNÍ POSTUPY V PROSTOROVÉ AKUSTICE

Šíření zvuku ve volném prostoru předpokládáme zvukovou vlnu jednorozměrnou, která postupuje jedním směrem. A současně vlnu postupnou, kdy v cestě vlny neleží žádná překážka, která by způsobovala odraz zvukové vlny zpět ke zdroji. [2]

Jevy, mající vliv na zvukové pole v uzavřeném prostoru řeší:

- vlnová teorie,
- statistická teorie,
- geometrická teorie.

V každém uzavřeném prostoru s protilehlými stěnami kromě postupné vlny vznikají také *stojaté vlny*. Stojaté vlnění vzniká skládáním (interferencí) dvou postupných vln téhož druhu a kmitočtu, ale opačných směrů šíření. Je-li odrazující plocha akusticky tvrdá, tedy, dochází-li k bezztrátovému odrazu, nastává úplné stojaté vlnění. Běžně, kdy stěna vykazuje určitou schopnost pohlcovat akustickou energii, vzniká při odrazu částečné stojaté vlnění. Každý uzavřený prostor má tak schopnost rezonovat na určitých vlastních kmitočtech, kterých je nekonečně mnoho. [2]

3.1. Vlnová teorie

Akustické pole v uzavřeném prostoru vybuzeé zdrojem konečných rozměrů je především souborem vlastních kmitů, které se vytvářejí při shodě budícího kmitočtu a vlastního kmitu místnosti. [1]

Vlastní kmitočty jsou určeny vztahem:

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1.15)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku ve vzduchu ($340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),

l_x, l_y, l_z rozměry uvažovaného prostoru v m,

n_x, n_y, n_z 0, 1, 2, ... celá čísla a jejich kombinace.

V oblasti nejnižších kmitočtů je zvukové pole v místnosti značně nevyrovnané, protože počet vlastních kmitů je nízký a kmity jsou nerovnoměrně rozloženy. Až od kmitočtu f_k , nazývaného kritický kmitočet. Ten je pro oktávová pásma dán vztahem:

$$fk = \frac{400}{\sqrt[3]{V}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.16)$$

a pro třetinooktávová pásma vztahem:

$$fk = \frac{600}{\sqrt[3]{V}} \quad (Hz) \quad (1.17)$$

kde V je objem místnosti v m^3

se vytváří akustické pole již s určitými znaky rovnoměrného rozložení. [1]

Poměr rozměrů stran (zejména u malých místností) má velký vliv na rozložení spektra vlastních kmitů a proto nalezení vhodného poměru stran z hlediska maximálního možného počtu vlastních kmitů patří mezi nejzákladnější problematiku vlnové teorie. [7] [1] [2]

ČSN 73 0525 udává doporučené poměry stran. Pro uzavřené prostory do objemu $200m^3$ je to 1:1,05:1,2. U větších prostor se doporučuje poměr stran 1:1,25:1,6, případně 1:1,7:2,9. [7]

Hlavní a nejdůležitější podmínkou je, aby žádný rozměr nebyl celistvým násobkem zbylých rozměrů. [3]

3.2. Statistická teorie

V praxi se často setkáváme s uzavřenými prostory nepravidelného tvaru (divadla, kulturní sály, posluchárny, kina). Odrazivé vlastnosti stěn nelze jednoduše vyjádřit a kromě toho v těchto prostorech bývají předměty, které způsobují rozptyl zvuku. Řešení vlnové rovnice za těchto podmínek nelze nalézt. Proto je nutno při vyšetřování vlastností zvukového pole vycházet z jiné představy. [2]

Je nutno mít na paměti, že k vytvoření zvukového pole v určitém bodě přispívají odrazy dílčích stěn, ploch a předmětů. Vzhledem k jejich nepravidelnému uspořádání a k velkému počtu odrazů zvuku budou zákonitosti vztahů akustických veličin podléhat zákonitostem velkého počtu jevů – tedy zákonitostem statistickým. [2]

Statistická teorie předpokládá určitá zjednodušení a předpoklady:

- Uvažuje se všesměrový dopad, což znamená, že pravděpodobnost všemožných úhlů, pod kterými dopadá zvuková energie do libovolného bodu je stejně vysoká. [7]
- Zvuková energie v kterémkoliv bodě prostoru a její velikost je dána součtem středních hodnot energie, která do tohoto bodu dorazila na základě odrazů od jednotlivých ploch prostoru. [7]
- Zvuková energie v kterémkoliv bodě prostoru má stejnou hustotu – předpokládá se tedy difúzní zvukové pole. [7]

Jednotlivým plochám tvořícím vnitřní obálku posuzovaného prostoru se přiřazuje materiálová charakteristika v podobě schopnosti daného povrchu pohlcovat dopadající akustickou energii. Tato schopnost je vyjádřena *činitelem zvukové pohltivosti* α (-). (viz kap. 2.1.1.)

Při výpočtech se využívá tzv. *ekvivalentní pohltivá plocha* A (m^2), která vyjadřuje schopnost dané plochy/povrchu pohlcovat dopadající akustickou energii. (viz kap. 2.1.1.)

Uzavřený prostor (viz kap. 2.1.1) se zpravidla skládá z mnoha jednotlivých povrchů o různých dílčích plochách S_i (m^2) a různých hodnotách činitele zvukové pohltivosti α_i (-) na jednotlivých kmitočtech. Celkovou pohltivost takového prostoru pak lze vyjádřit vztahem [2]:

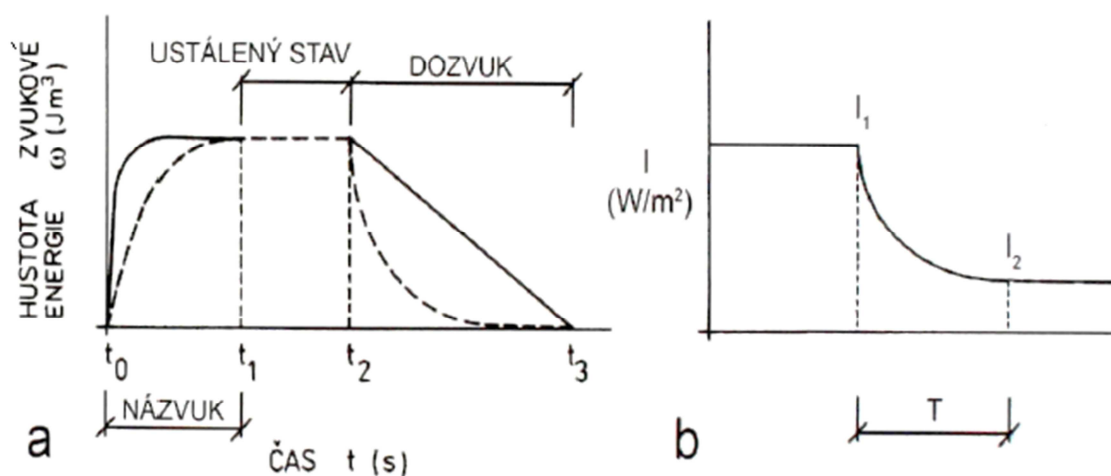
$$A = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot S_i) \quad (m^2) \quad (1.18)$$

Jednou z hlavních sledovaných vlastností v prostorové akustice je dozívání hladiny akustického tlaku zvuku po vypnutí zdroje zvuku. Vyjadřuje se veličinou nazvanou *doba dozvuku*. (viz 2.1.1.)

Doba dozvuku

V ustáleném režimu je v uzavřeném prostoru vytvořený takový stav, kdy zdroj zvuku neustále doplňuje energii pohlcenou stěnami. Jestliže vypneme zvukový zdroj, bude akustická energie v prostoru postupně ubývat, až bude zcela pohlcena. Zvuk, který se šíří prostorem po vypnutí zdroje, se nazývá dozvuk. [1]

Dobou dozvuku rozumíme čas, za který poklesne hladina akustické energie v místnosti po vypnutí zdroje o 60 dB. V časovém průběhu doby dozvuku se uplatní postupně přímý zvuk od zdroje a další odrazy přicházející z různých směrů. Pro charakteristiku vlastností uzavřeného prostoru je dozvuk velmi důležitý. Je jedním z parametrů, které lze spolehlivě předpovědět i výpočtem. [1]



Obr. 2 Vznik názvuku a dozvuku v uzavřeném prostoru: a) vyjádřený hustotou zvukové energie, b) akustickou intenzitou [9]

V průběhu praktického užívání různých výpočetních vztahů pro dobu dozvuku se ustálil tzv. Eyringův vztah ve tvaru (viz ČSN 73 0525):

$$T_E = \frac{0,164V}{-S \ln(1 - \alpha) + 4mV} \quad (s) \quad (1.19)$$

kde T_E je doba dozvuku v s,

V objem místnosti v m^3 ,

$S=S_1+S_2+...S_n$ celková plocha ohraničujících stěn v m^2

m činitel útlumu ve vzduchu (m^{-1}), který se uplatní u kmitočtů nad 2000 Hz a velkých prostorů (pro $V > 2000 m^3$).

U prostor s objemem $V \leq 2000 \text{ m}^3$ se člen $4mV$ pro útlum zvuku ve vzduchu v dané místnosti nepoužije.

U méně tlumených prostor s činitelem zvukové pohltivosti $\alpha_s \leq 0,2$ [-] lze pro výpočet doby dozvuku použít tzv. Sabienův vztah [1]:

$$T_E = \frac{0,164V}{A + 4mV} \quad (s) \quad (1.20)$$

kde $\frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$ je celková pohltivost v m^2

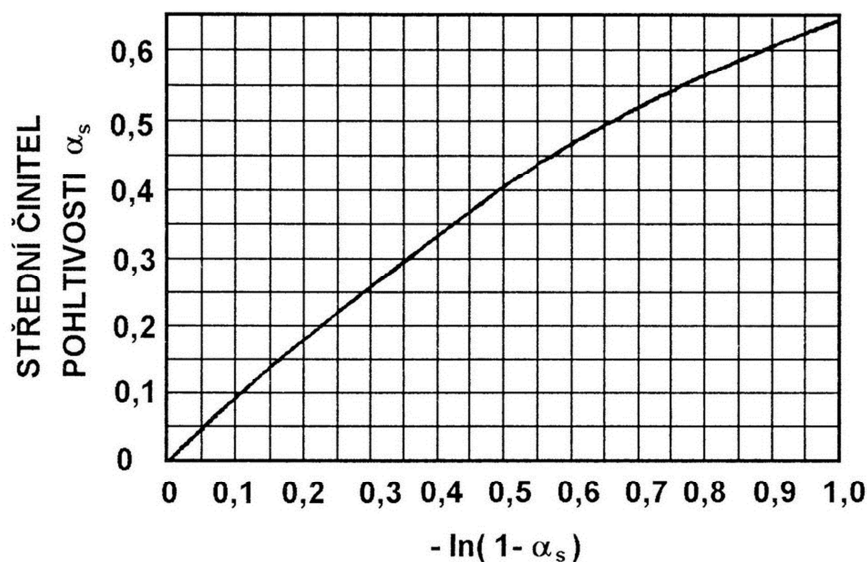
α_{si} činitel pohltivosti dílčího materiálu,

S_i plocha dílčího materiálu m^2

V objem místnosti v m^3 ,

m činitel útlumu ve vzduchu v m^{-1} .

Grafické znázornění závislosti mezi činitelem pohltivosti dle Sabienova a Eyringova vztahu je uvedeno na následujícím obrázku.



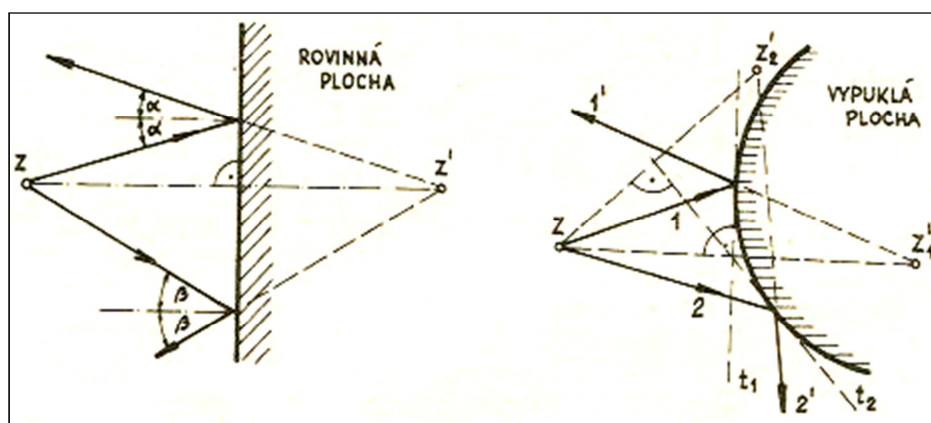
Obr. 3 Graf závislosti α_s na $-\ln(1-\alpha_s)$ [1]

3.3. Geometrická teorie

Zjednodušující předpoklady statistické teorie nepostihují některé jevy, které se v uzavřeném prostoru mohou projevit rušivě, např. ozvěna nebo třepotavá ozvěna. Vznik těchto jevů zpravidla zjišťujeme vyšetřováním chodu zvukových paprsků, které vysílá zdroj (pokud neprovedeme přímo akustické měření). [2]

Geometrická akustika se zabývá chodem zvukových paprsků vysílaných zdrojem, vyšetřováním dráhových a časových rozdílů mezi zvukem do uvažovaného místa přímo od zdroje a zvukem odraženým. [2]

Pro zvukový paprsek, stejně jako v optice, platí zákon rovnosti úhlu dopadu a odrazu. Konstrukci zvukových paprsků po odrazu od rovinných konstrukcí provádíme pomocí zdánlivého zdroje Z' . [2]



Obr. 4 Konstrukce odrazu zvukového paprsku pomocí zdánlivého zdroje [9]

Řešení prostoru metodou geometrické akustiky je nutné provádět již ve stádiu úvodního projektu – architektonické studie. Sleduje se hlavně tvar stěn a stropu z hlediska rovnoměrného zásobování hlediště zvukovými vlnami a z hlediska možnosti vzniku nežádoucí ozvěny nebo třepotavé ozvěny. [2]

Ve velkorozměrných sálech s odrazivými plochami může vzniknout ozvěna tehdy, když odražený zvuk dospěje k posluchači s časovým zpožděním. [2]

Odražený zvukový paprsek překonává k posluchači větší dráhu, než paprsek přímý. Z tohoto důvodu se odražený zvukový paprsek dostává k posluchači s určitým časovým zpožděním, oproti paprsku přímému. Pro výpočet časového zpoždění platí vztah [8]:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c_0} \quad (s) \quad (1.21)$$

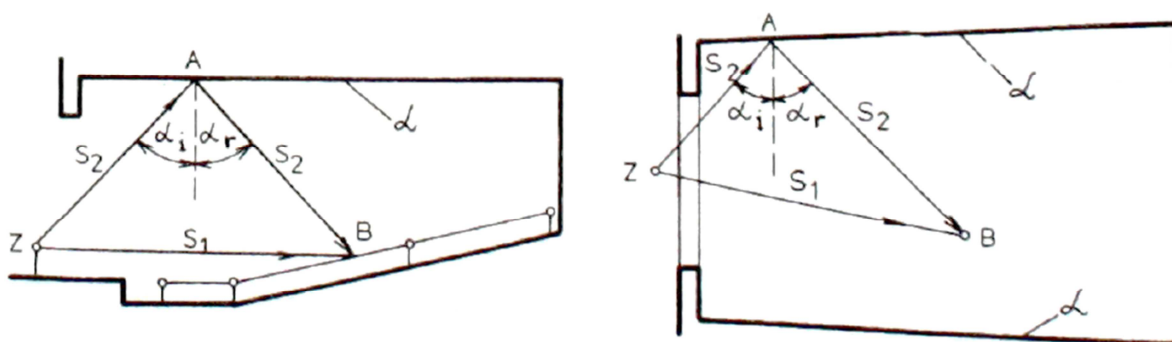
kde c_0 je rychlost šíření zvuku ve vzduchu (340 m.s^{-1}),

Δt časové zpoždění v s,

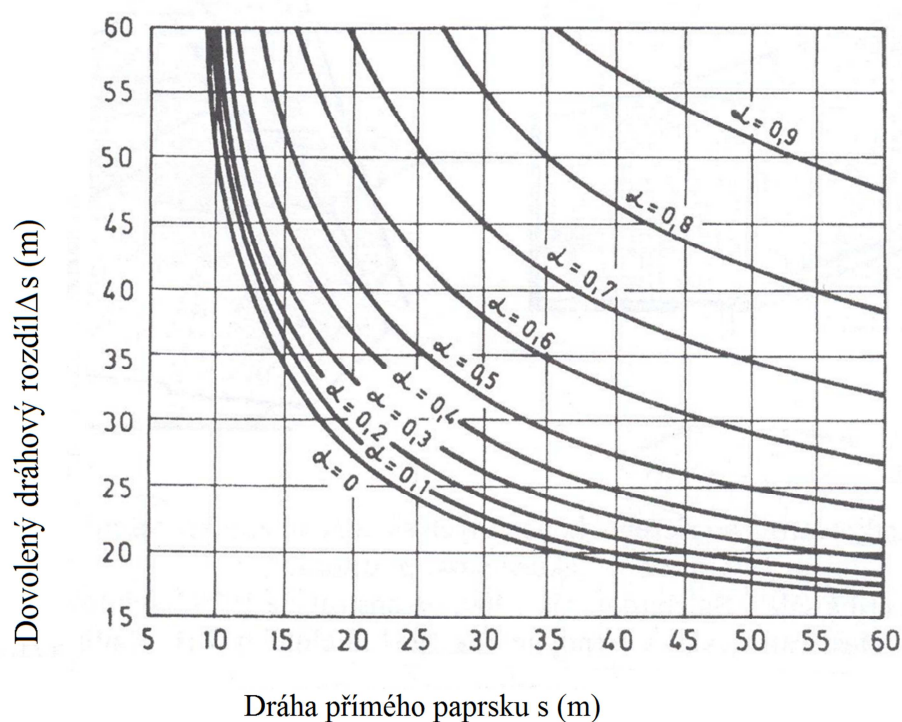
Δs rozdíl dráhy přímého a odraženého zvukového paprsku.

Vliv zpoždění prvního odraženého zvuku za přímo šířeným zvukem na kvalitu poslechu [10]

Zpoždění (s)	Dráhový rozdíl (m)	Vliv na kvalitu poslechu
$< 0,03$	$< 10,2$	Zesílení zvuku
0,03 až 0,05	10,2 až 17,0	Směšování
$> 0,05$	$> 17,0$	Ozvěna
0,10	34,0	Jednoslabičná ozvěna



Obr. 5 Dráhový rozdíl přímého a odraženého zvukového paprsku v půdorysu a řezu [8]



Obr. 6 Dovolený dráhový rozdíl (platí pouze pro jeden rušivý odraz a to od rovinné plochy) [8]

Oblast geometrické akustiky je velmi obsáhlá a v rámci této práce byly pouze naznačeny některé principy, metody a účely, ke kterým se dá nástrojů této oblasti prostorové akustiky využít.

3.4. Simulační metody v prostorové akustice

Klasické výpočtové metody statistické akustiky využívají jednoduché výpočtové vztahy a zeměřují se především na co nejpřesnější zjištění frekvenčního průběhu času dozvuku, případně hladin akustického tlaku v posuzované místnosti. Klasické geometrické metody jsou založené na fyzikálním zákonu o odrazu a ve všeobecnosti se orientují na design navrhované místnosti, kontrolu pokrytí hlediště (např. v divadelním sále či auditoriu) přímým a odraženým zvukem a slouží jako základ algoritmu pro mnohé počítačové programy. [12]

Základním rozdílem mezi simulačními metodami a tradičními statistickými metodami je v tom, že výsledkem simulace není pouze všeobecná celková hodnota času dozvuku, případně hladiny akustického tlaku, ale je to impulzní odezva prostoru, ze které můžeme odvodit většinu akustických veličin, podobně jako z měření. Simulace takzvaně simuluje měření. [12]

V současnosti existuje více typů programů, s jejichž pomocí můžeme simulovat virtuální prostor a získat jeho akustické vlastnosti. Mnohé z těchto programů spolupracují s CAD systémy, což přispívá k rychlejšímu a snadnějšímu vytvoření geometrie modelu prostoru. Příkladem je AutoCAD a následný export geometrie místnosti do akustického software. [12]

Co se týká simulačních metod, existuje víc typů algoritmů používaných v praxi. Mezi nejrozšířenější patří *metoda zrcadlového zdroje* (Image Source Method – IMS) a *paprsková metoda* (Ray Tracing – RTM) a její varianty (Beam – Tracing, Cone – Tracing atd.). Některé programy využívají i kombinaci těchto metod, nejčastěji metodu zrcadlového zdroje s paprskovou metodou. [12]

Speciální skupinu simulačních programů tvoří programy založené na *metodě konečných prvků* (Finite Element Method – FEM) a jejích variantách, kterými jsou např. *metoda konečných objemů* (Control Volume Method – CVM), nebo metoda okrajových elementů (Boundary Element Method – BEM). [12]

Metoda zrcadlového zdroje

Metoda zrcadlového zdroje, někdy nazývaná i jako metoda myšleného zdroje (ISM) je založená na zákonu o odrazu (úhel dopadu se rovná úhlu odrazu). Software, který je na této metodě založený tedy počítá polohy zrcadlových obrazů zdroje zvuku za odrazovými povrchy, vytváří spojnice zvukových paprsků spojením obrazu zdroje zvuku s mikrofonom a z délky 3D vektorů zvukových paprsků pozná čas ve kterém odražený zvuk přichází

k posuzovanému bodu. Každý odraz se zaznamenává v paměti počítače a postupně se vytváří reflektogram ze kterého se později odvodí impulsová odezva na sledované pozici. [12]

Za normálních podmínek roste počet zrcadlových zdrojů exponenciálně, proto je tato metoda vhodna pouze pro menší a jednodušší modely, tj. modely s malým počtem stěn. [12]

Paprsková metoda

Paprsková metoda našla v minulosti uplatnění zejména v simulaci denního osvětlení. Světelné vlny totiž lze díky jejich malé vlnové délce (v porovnání s rozměry staveních konstrukcí) považovat za paprsky. V akustice byla paprsková metoda poprvé použita v šedesátých letech při simulaci koncertních sálů Krokstadom, Stromom a Sorsdalom. Dnes se využívá hlavně v kombinaci s jinými metodami a velmi často bývá použita v různých modifikacích. [12]

Paprsková metoda v akustice předpokládá, že za určitých okrajových podmínek můžeme zvukové vlny modelovat jako paprsky. Ve středních a vysokých kmitočtech (nad 500 Hz) tato metoda obvykle dobře koreluje s měřením. V nižších kmitočtech musíme někdy počítat s menšími odchylkami. Moderní software však dokáže tento předpoklad (považování zvukových vln za paprsky) kompenzovat v algoritmu výpočtu, pomocí difúzních modelů. [12]

Paprsková metoda v akustických programech generuje z bodového zdroje množství zvukových paprsků a sleduje dráhu šíření a odrazy každého z nich. Způsob, jakým jsou paprsky z virtuálního zdroje vyslané, může být buď předdefinovaný, nebo náhodný. Typické je však rovnoměrné rozložení paprsků kolem zdroje. Posluchači jsou typicky modelováni jako objemové tělesa. Nejčastěji se využívají kulové tvary protože umožňují všesměrnou strukturu, kterou je možné relativně lehko uplatnit při výpočtu. Pro výpočet je též velmi důležité, aby přes objem virtuálního posluchače proniklo co nejvíce paprsků a tím bylo dosaženo co nejlepších statistických výsledků. [12]

Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (Finite Element Method – FEM) se ve velké míře využívá při řešení všeobecných úloh stavební mechaniky. Základem metody konečných prvků je generování sítě bodů v posuzovaném prostoru, sestavení bodů z prvků sítě, interpolace pro spojení lokálního řešení s uzlovými body a řešení parciálních diferenciálních rovnic zvukového vlnění v uzlových bodech. Uzlové body jsou body, ve kterých se počítají funkční hodnoty řešení, případně derivace určujících veličin. Uzlové body sítě vytváří strukturu prvků, které vyplňují fyzikální oblast prostoru. Prvky mohou být jedno, dvou či třírozměrné. Hranice každého prvku je určena uzlovými body, ale uzlové body se mohou nacházet ve vnějšku i vnitřku a na stěnách prvku. Stěny prvku mohou být lineární, ale i kvadratické čáry. Pro dosažení spolehlivých výsledků v akustice je potřebných minimálně šesti prvků na vlnovou délku a proto je vhodné využívat této metody jen pro malé místnosti a

pro nízké frekvence. Při použití těchto metod je tedy kromě geometrického modelu prostoru potřeba zkonstruovat i konvergující síť.

4. MATERIÁLY A KONSTRUKCE POUŽÍVANÉ V PROSTOROVÉ AKUSTICE

Různé typy a uspořádání materiálů a konstrukcí používaných pro pohlcování a rozptylování zvuku slouží k cílené úpravě doby dozvuku, zvýšení srozumitelnosti nebo ke snížení hluku v uzavřeném prostoru, kde se zdroj zvuku většinou nachází. Výběr vhodného materiálu se řídí nejen akustickými požadavky, ale také hledisky estetickými, hygienickými a částečně i subjektivními ve vztahu k uživatelům prostor. [1]

Vlastnosti pohlcujících materiálů jsou reprezentovány činitelem zvukové pohltivosti α , který je závislý na kmitočtu a na směru dopadu zvukové vlny. Pro kolmý dopad zvukových vln se čísel pohltivosti označuje α_N a nabývá hodnot 0 až 1. Čísel pohltivosti pro všesměrný dopad zvuku se označuje α_s a zjišťuje se v dozvukové komoře. Vlivem ohybových jevů na okrajích vzorku měření materiálu může být ekvivalentní plocha pohlcování zvuku větší než vlastní plocha vzorku a čísel α_s pak může dosáhnout i vyšších hodnot než je 1. [1]

Akustické materiály a konstrukce můžeme z hlediska uspořádání rozdělit na porézní (vláknité) materiály, pohltivé obklady na principu kmitající desky a membrány, rezonátory dutinové a na rozptylové prvky. [1] [2]

4.1. Porézní materiály

Při použití porézních materiálů během úpravy a měření prostorů je rozhodující tloušťka materiálu a tloušťka vzduchového polštáře. V porézních látkách dochází k nevratné změně zvukové energie v tepelnou a to třemi způsoby:

- třením
- relaxací akustického tlaku
- nepružnou deformací

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází při pohybu částic vzduchu v jednotlivých navzájem propojených pórech materiálu. Mezi porézní materiály lze zařadit výrobky ze skelných a minerálních vláken, textilie, stříkaná vlákna apod. Čísel pohltivosti těchto materiálů je závislý na tloušťce vrstvy materiálu, na kmitočtu a uspořádání pórů, lze ho přesně určit pouze měřením (viz obrázek 7). [1]

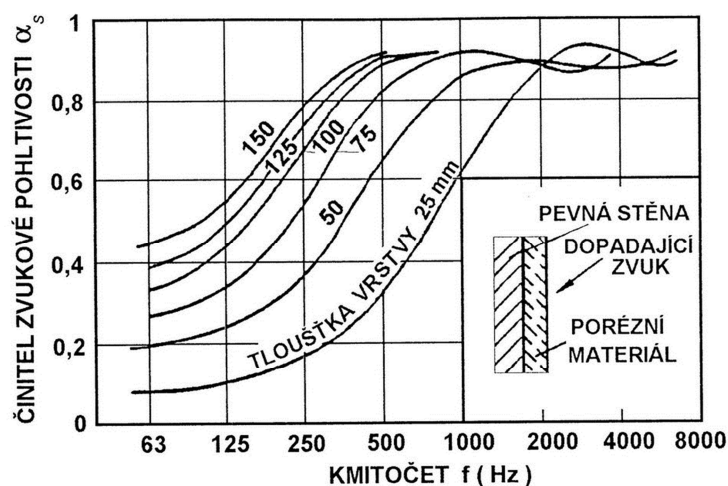
Dobrou účinnost ($\alpha > 0,6$) vrstvy porézního materiálu, spočívajícího na pevné stěně, je možné očekávat až od kmitočtu

$$fm = \frac{1}{10} \cdot \frac{c}{h} = \frac{34,3}{h} \quad (Hz) \quad (1.22)$$

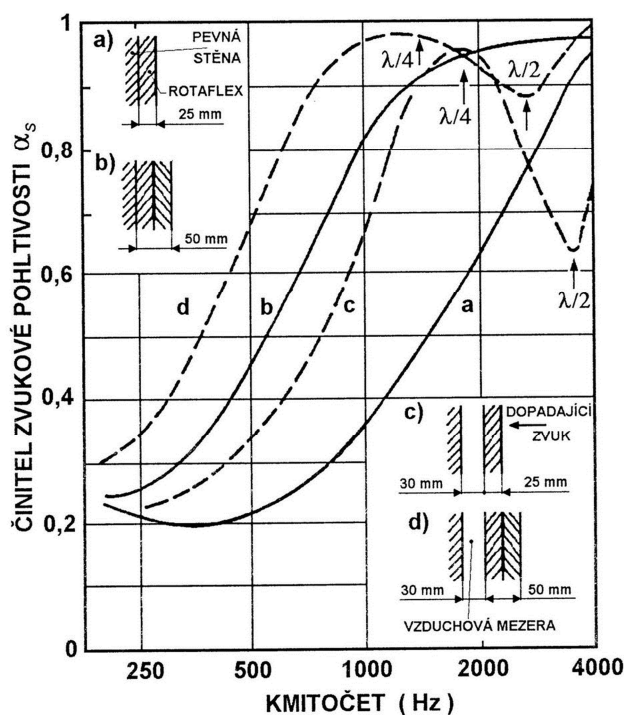
kde h je tloušťka vrstvy v m,

c rychlost zvuku ve vzduchu v m. s⁻¹. [1]

Z této rovnice je zřejmé, že pohlcování nízkých kmitočtů by vyžadovalo obklady velkých tloušťek. Je nevýhodné přichytit materiál přímo na stěnu, neboť u stěny je akustická rychlost nulová a velikost přeměny akustické energie v tepelnou je malá. Naopak je tedy výhodné umístit materiál v určité vzdálenosti od stěny. Maximální hodnoty činitele pohltivosti se dosáhnou pro $\lambda/4$ od stěny. Zde je maximální nejen akustická rychlost, ale i přeměna akustické energie na tepelnou. Kmitočtová charakteristika činitele pohltivosti bude mít další maximum pro liché násobky $\lambda/4$. Příklad pro rohož Rotaflex tloušťky 25 mm a 50 mm a vzduchovou mezeru 30 mm je uveden na obr. 8. [1]



Obr. 7 Příklad kmitočtového průběhu činitele zvukové pohltivosti v závislosti na tloušťce vrstvy pohltivého materiálu [1]



Obr. 8 Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti Rotaflex (skelné vlákno) o objemové hmotnosti 30 kg/m^3 [1]

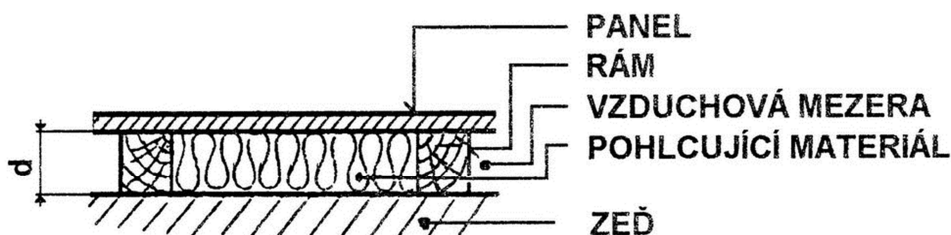
4.2. Kmitající desky a membrány

Kmitající panely jsou tvořeny tuhou deskou pružně uchycenou na uzavřeném rámu. Vzduchový polštář je obvykle zatlumen porézním materiálem. Schematický náčrt prvku je znázorněn na obr. 9. Pohltivého účinku se dosahuje mechanickými ztrátami třením v pružném uložení desky a odporem vzduchového polštáře proti stlačení. K maximálnímu pohlcování dochází u rezonančního kmitočtu f_0 , který je určen vztahem [1][4]

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.23)$$

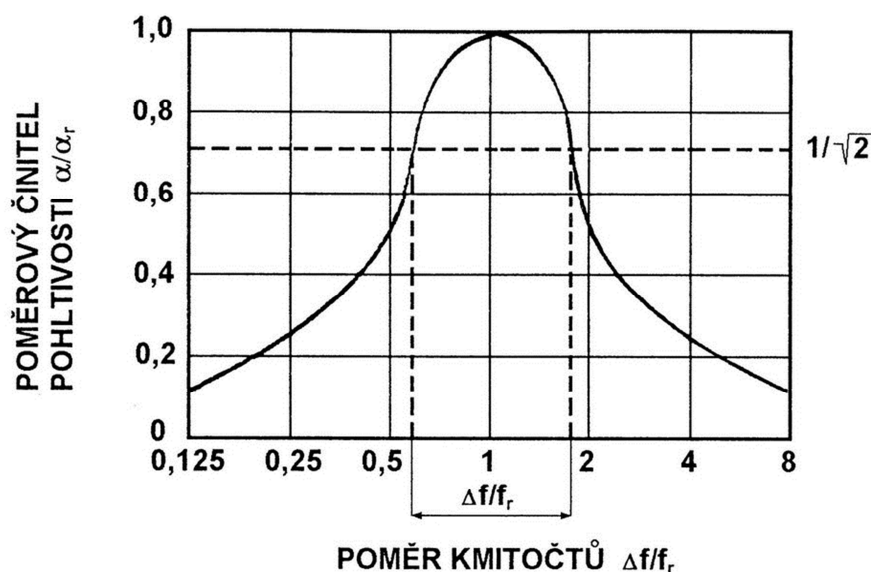
kde m' je plošná hmotnost desky v kg.m^{-2}

d tloušťka vzduchového polštáře v m.



Obr. 9 Řez kmitajícím panelem [1]

Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti kmitajícího panelu vztažený k rezonančnímu kmitočtu je znázorněn na obrázku 10. Z obr. 10 lze určit i skutečnou velikost činitele pohltivosti v závislosti na hodnotě činitele pohltivosti α_r u rezonančního kmitočtu. Kmitající tuhé desky se uplatňují zejména v oblasti kmitočtů mezi 50 Hz až 300 Hz. [1] [2]



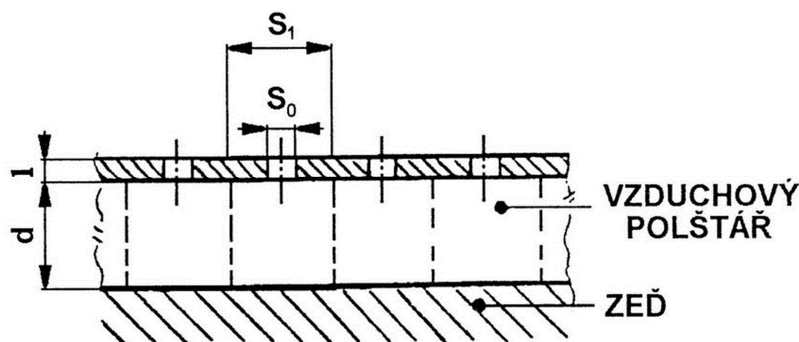
Obr. 10 Normovaný kmitočtový průběh činitele pohltivosti kmitajících panelů f_0 – rezonanční kmitočet v Hz, α_r – hodnota činitele pohltivosti u rezonančního kmitočtu (u kmitajícího panelu bývá obvykle 0,5 až 0,6), Δf – efektivní šířka pásma v Hz. [1][4]

Membrány jsou tenké desky či fólie, které se vyznačují malou plošnou hmotností a nepatrnou tuhostí v ohybu ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře mezi membránou a pevnou stěnou. Základní rezonanční kmitočet kmitající soustavy na vzduchovém polštáři je dán stejným vztahem jako u kmitající desky. Kromě základní rezonance se u membrán mohou projevit i vyšší rezonance, způsobené vlastní poddajností a rozměry membrány. Účinnost prvku je možné výrazně ovlivňovat porézním materiálem ve vzduchovém polštáři a je vyšší v širším kmitočtovém pásmu než u kmitajících desek.

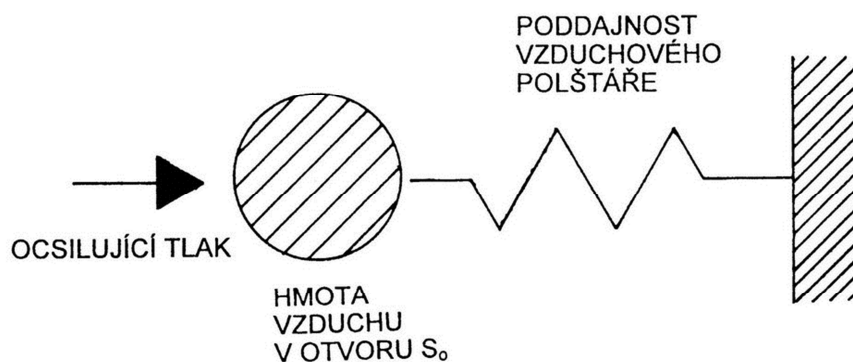
Jako membrány lze použít např. měkké desky, napnuté textilie, fólie z umělých hmot, koženku apod. [1]

4.3. Dutinové rezonátory

Dopadá-li na rezonanční soustavu zvuková vlna, uvede ji do vynuceného kmitání. Při rezonanci je amplituda kmitů maximální a v soustavě je nahromaděno maximální množství energie. Má-li rezonanční soustava účinně pohlcovat zvuk, musí být soustava dostatečně tlumena, aby co největší množství nahromaděné akustické energie bylo přeměněno na teplo. Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu vždy vykazuje u rezonančních soustav maximum na vlastním kmitočtu soustavy. V praxi jsou rezonátory tvořeny děrovanými deskami uchycenými na uzavřeném rámu. Vzduchový polštář je obvykle tlumen pohltivým materiálem. Pohltivého účinku se dosahuje kmitáním vzduchu v otvorech a přeměnou zvukové energie na teplo. Schematický náčrt soustavy tzv. Helmholtzova rezonátoru je uveden na obr. 11. Na obr. 12 je představena mechanická analogie. [1]



Obr. 11 Schematický řez Helmholtzovým rezonátorem, S_1 – průřez dutiny rezonátoru příslušný jednomu otvoru, S_0 – průřez vstupního otvoru [1]



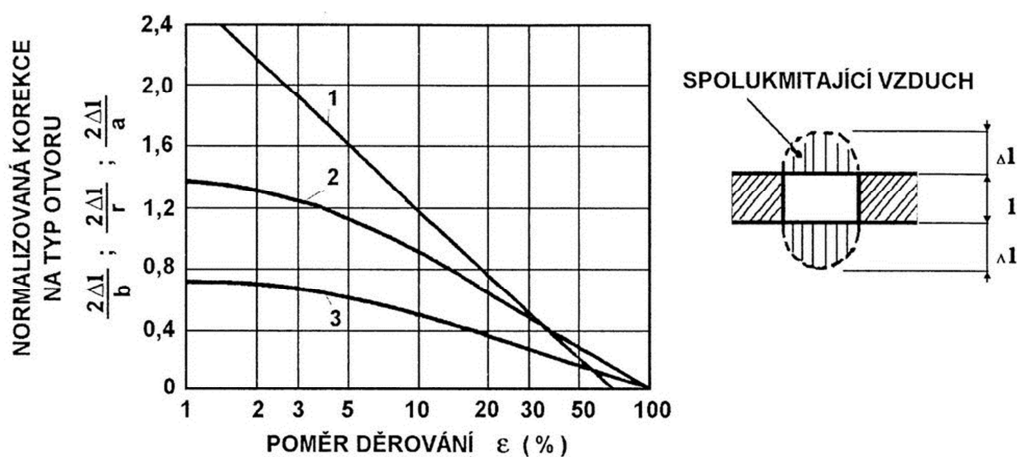
Obr. 12 Mechanická analogie Helmholtzova rezonátoru [1]

V praxi využíváme pro výpočet rezonančního kmitočtu vztah [1]:

$$f_0 = 55 \sqrt{\frac{S_o}{V(l + 2\Delta l)}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.24)$$

kde S_o je plocha jednoho otvoru v m^2 ,
 $V = S_1 d$ objem dutiny rezonátoru pro jeden otvor v m^3 ,
 S_1 průřez dutiny rezonátoru pro jeden otvor v m^2 ,
 d hloubka vzduchového polštáře v m,
 l tloušťka desky s otvory nebo délka hrdla rezonátoru v m,
 $2\Delta l$ koncová korekce v m. [1]

Korekce délky otvoru $2\Delta l$ zahrnuje působení hmotnosti spolukmitajícího vzduchu po obou stranách otvoru. V závislosti na hustotě děrování desky $\varepsilon = S_o/S_1$ (%) je tato korekce pro kruhové, čtvercové a štěrbinové (obdélníkové) otvory vynesena na obr. 13.

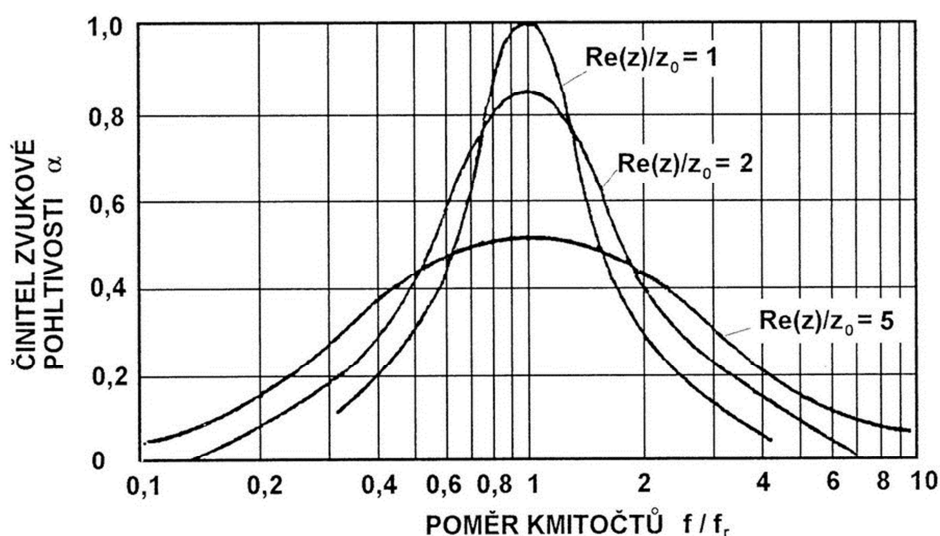


Obr. 13 Korekce $2\Delta l$ pro kruhové, čtvercové a štěrbinové otvory vztažené na poloměr otvoru r , stranu čtverce a a na šířku štěrbin b v závislosti na poměru děrování ε (1 – štěrbin, 2 – kruhové otvory, 3 – čtvercové otvory) $\varepsilon = S_o/S_1 \cdot 100$ (%). [1]

Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti Helmholtzových rezonátorů je silně závislý na tlumení rezonátoru, tj. na poloze a vlastnostech vloženého porézního materiálu. Vhodným umístěním pohltivého materiálu za otvor a do dutiny rezonátoru lze dosáhnout optimálního přizpůsobení buď pro maximální hodnoty α , nebo větší šířku pásma účinnosti. Závislost činitele pohltivosti Helmholtzova rezonátoru na poměru reálné složky měrné akustické impedance vloženého tlumicího materiálu $\text{Re}(z)$ k vlnovému odporu vzduchu z_0 , vztažená k vlastnímu kmitočtu rezonátoru f_0 , je znázorněna na obr. 14. Měrná akustická impedance akustického materiálu z je komplexní veličina určená poměrem akustického tlaku a akustické rychlosti na povrchu materiálu. Vlnový odpor vzduchu z_0 je určen součinem $\rho \cdot c$, kde ρ je měrná hmotnost vzduchu a c rychlost šíření zvuku. [1]

Pokud je měrný akustický odpor materiálu roven vlnovému odporu vzduchu ($z_0 = z$), jedná se o optimální přizpůsobení a činitel pohltivosti α je roven 1.

Rezonátory lze naladit na libovolný kmitočet zhruba v pásmu 200 Hz až 2000 Hz. Ve speciálních případech mají rezonátory jen jeden kruhový či obdélníkový otvor, anebo dlouhou štěrbinu. Tyto rezonátory jsou obvykle laděny do oblasti nejnižších kmitočtů. [1]



Obr. 14 Závislost činitele zvukové pohltivosti a Helmholtzova rezonátoru na poměru $\text{Re}(z)/z_0$,
 z_0 – akustická impedance vzduchu; $z_0 = \rho \cdot c = 400 \text{ kgm}^2 \text{ s}^{-1}$
 z – akustická impedance materiálu [1]

4.4. Rozptylové prvky

Akustickou kvalitu uzavřených prostor příznivě ovlivňuje rozptyl zvuku. Vhodnou distribucí odraženého zvuku z hlediska prostorového i časového lze výrazně zlepšit celkový dojem posluchače. [1][2]

Pro úpravu akustického pole v prostoru se užívají různé prvky nazvané difuzory. Tvarově jsou to prvky s vhodně volenou reliéfní úpravou, např. jehlany nebo různě lomené či vypouklé plochy. V poslední době se rozšířilo užívání nových velmi účinných difuzních prvků na principu tzv. akustické difrakční mřížky, označovaných jako RPG (z anglického názvu Reflection Phase Grating, tj. odrazová fázová mřížka). [1]

Důležitým faktorem pro dobrou účinnost rozptylového prvku jsou jeho dílčí rozměry ve vztahu k délce dopadajících zvukových vln. Obecně k rozptylu dochází tehdy, pokud prostorová nerovnost (výška reliéfu) prvku rozměrově odpovídá nebo přesahuje délku vlny. Rozptylové prvky by v ideálním případě měly odrážet zvuk do celé polokoule v co nejširším kmitočtovém rozsahu. [1]

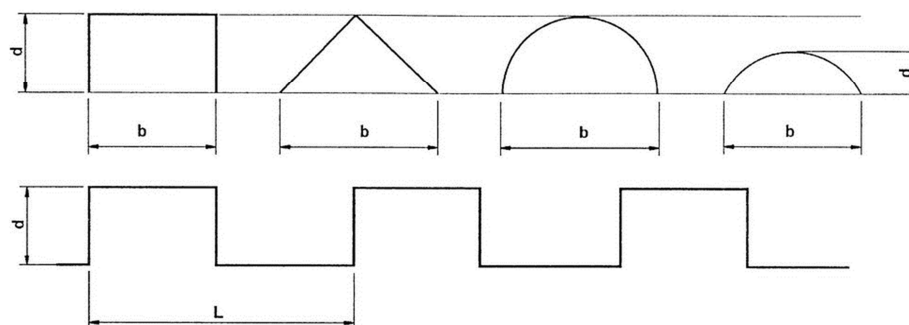
Potřebného rozptylného účinku se dosahuje vhodnou volbou a prostřídáním prvků, nebo jejich periodickým uspořádáním. V následující části jsou uvedeny základní údaje významné pro periodické struktury z prvků klasických tvarů a pro panely RPG. [1]

4.4.1. Klasické rozptylové prvky

Základní průřezy prvků s výškou d , šířkou b , řazených do periodické struktury s periodou L jsou na obr. 15.

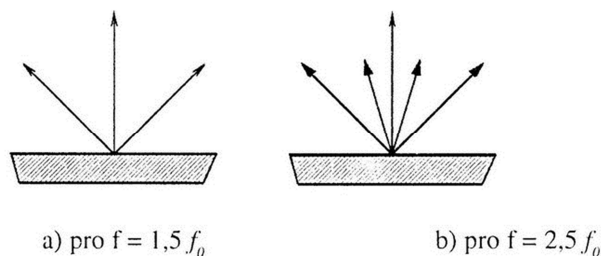
Při dopadu rovinné zvukové vlny na periodickou strukturu dochází pro určité kmitočty k rozptylu zvuku do více směrů. Nejlepších rozptylových účinků se dosáhne za následujících podmínek (λ je délka dopadající zvukové vlny [$\lambda = c/f$]) [1]:

- $d = \lambda/4$
- $d \approx L/4$ až $L/5$
- $d \leq b \leq L$.



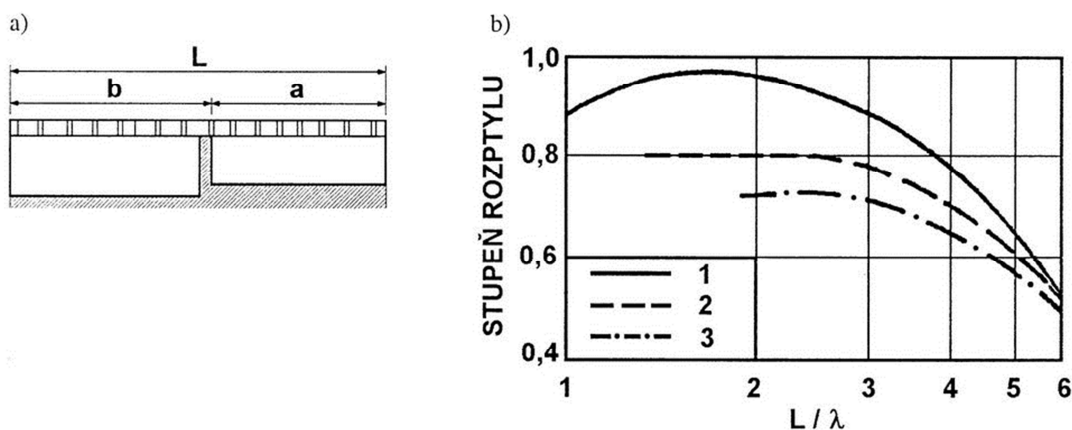
Obr. 15 Periodické struktury rozptylující zvuk [1]

Schematické znázornění difúzního účinku periodické pilové struktury pro oblast kmitočtů nad dolním kmitočtem účinnosti f_0 je uvedeno na obr. 16. Nevýhodou periodických struktur s klasickými rozptylovými prvky je relativně úzké pásmo účinnosti. Dobrého rozptylu zvuku se dosahuje pouze při vlnových délkách srovnatelných s délkou periodické struktury. [1]



Obr. 16 Odrazy od pilovité struktury ($f_0 = c/\lambda_0$) [1]

Příkladem periodických struktur rozptylujících zvuk jsou i pravidelně prostřídáné plochy (v páslech nebo šachovnicově) s odlišnou akustickou impedancí. Mohou to být akustické obklady na principu různě naladěných kmitajících desek a rezonátorů, nebo prostřídáné odrazivé a pohltivé plochy. Schematické uspořádání takovéto periodické struktury s délkou periodické struktury L je uvedeno na obr. 17a. Její účinek v závislosti na rozměrech a délce vlny je na obr. 17b. Šířka pásma účinnosti těchto struktur představuje asi dvě až tři oktávy. [1][2]



Obr. 17 Rozptylový účinek sestavy rozdílně naladěných rezonátorů [1]:

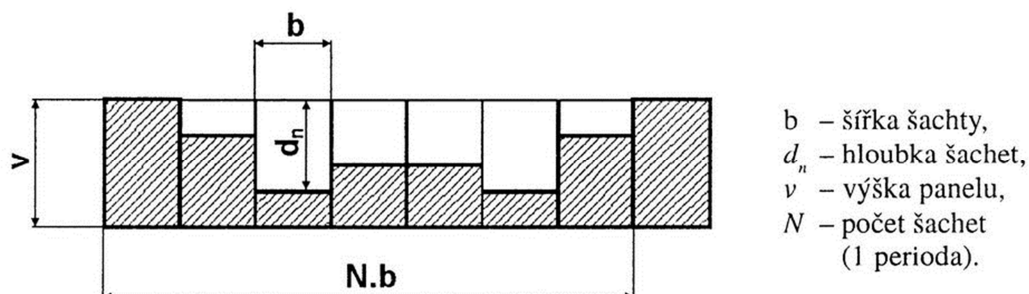
a) schematické uspořádání

b) stupeň rozptylu v závislosti na poměru délky periodické struktury L k délce vlny λ

křivka 1: $a/b = 1$ 2: $a/b = 0,5$ 3: $a/b = 0,33$

4.4.2. Difuzní prvek RPG

Difuzní panel RPG je tvořen soustavou stejně širokých, ale různě hlubokých šachet vzájemně oddělených tenkými přepážkami, jak je naznačeno na obr. 18. [1]



Obr. 18 Řez difuzním panelem RPG [1]

Dopadající zvuková vlna se odráží v jednotlivých šachtách ode dna a vrací se zpět. V důsledku různých hloubek šachet mají odražené zvukové vlny u povrchu panelu různé fáze. Dochází k difrakčním jevům a rovnoměrnému šíření odrazů do poloprostoru nad panelem v celém pracovním pásmu kmitočtů. Porovnání časového a prostorového rozložení odražené energie u panelu RPG a u prvku akusticky pohltivého a odrazivého je znázorněno na obr. 19. [1]

Uvažovaný typ panelu s podélnými štěrbinami se označuje jako jednorozměrný na rozdíl od dvourozměrného, u něhož mají šachty čtvercový půdorys. Základní vztahy pro výpočet jednorozměrného panelu jsou uvedeny v následující části. [1]

Výpočtové vztahy pro návrh panelu RPG

Prvky RPG se navrhují pro zvolený rozsah kmitočtů od spodního kmitočtu pracovního pásma f_0 (Hz) do horního kmitočtu pracovního pásma f_{\max} (Hz).

Šířka šachet je určena vztahem

$$b = \frac{c}{2f_{\max}} \quad (m) \quad (1.25)$$

kde c je rychlost šíření zvuku. [1]

Potřebný počet šachet N panelu pro jednu periodu opakování se určí ze vztahu

$$N = (p-1) \frac{f_{\max}}{f_0} = (p-1) \frac{c}{2f_0 b} \quad (1.26)$$

kde p je počet hlavních směrů odrazů (laločů směrové charakteristiky) v úhlu $\pm 90^\circ$ při kmitočtu f_0 . [1]

Pro správnou funkci difuzoru musí být N prvočíslo, proto se počet šachet (1 perioda) stanoví jako prvočíslo nejbližší k hodnotě vypočítané dle předchozího vztahu. [1]

Hloubky šachet d_n jsou určeny kvadratickou řadou podle vztahu

$$d_n = S_n \frac{c}{2Nf_0} \quad (m) \quad (1.27)$$

Pro koeficienty S_n platí, že

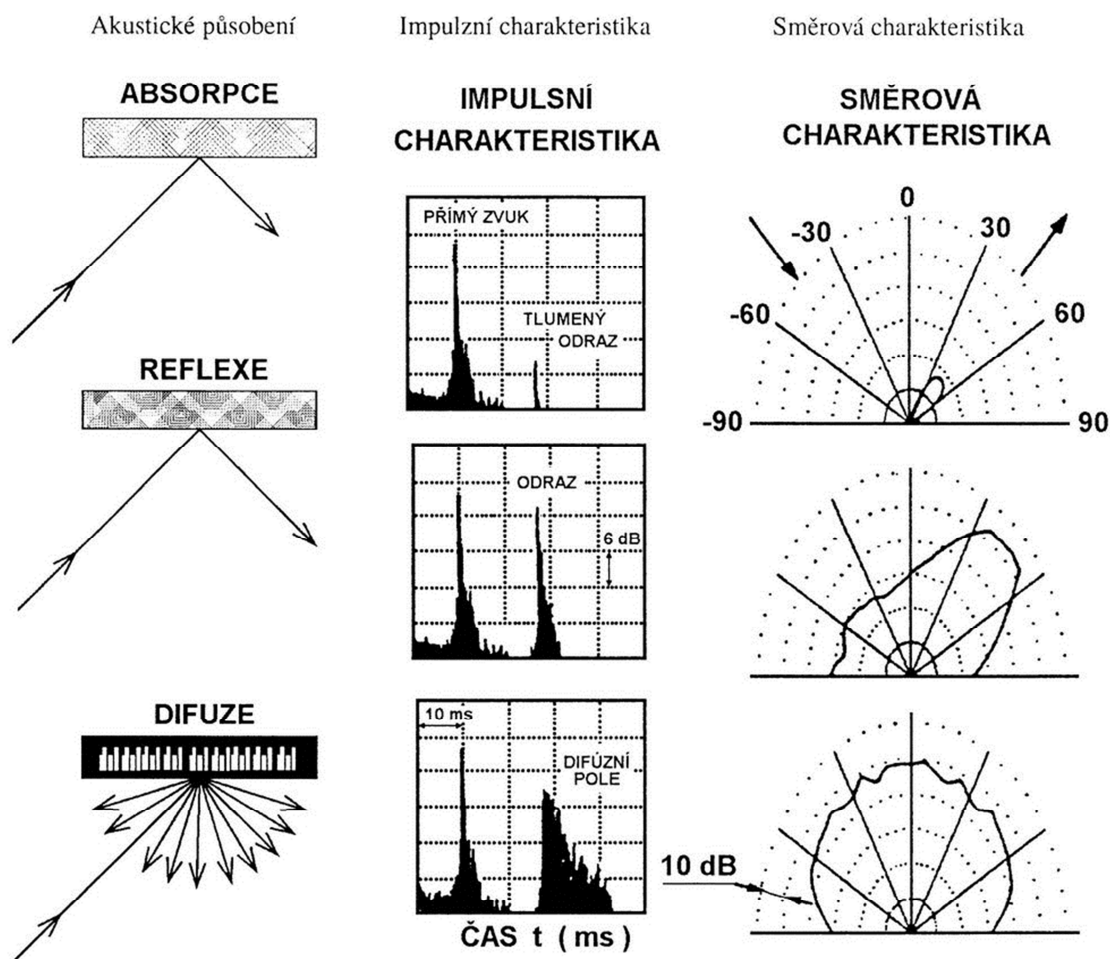
$$S_n = n^2 \pmod{N} \quad (1.28)$$

kde $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$,

\pmod{N} modul čísla N ,

tj. $S_n = n^2 - kN$, kde k je celá část čísla n^2/N .

Hloubka šachet se pohybuje v rozmezí od 0 přibližně do poloviny vlnové délky rezonančního kmitočtu f_0 . Šachty vykazují zrcadlovou symetrii vůči středové ose panelu a pro $n \geq N$ se periodicky opakují. [1]



Obr. 19 Časové a směrové rozložení odražené energie pro akustický pohlcovač, odražeč a difuzor RPG při šikmém dopadu zvuku. [1]

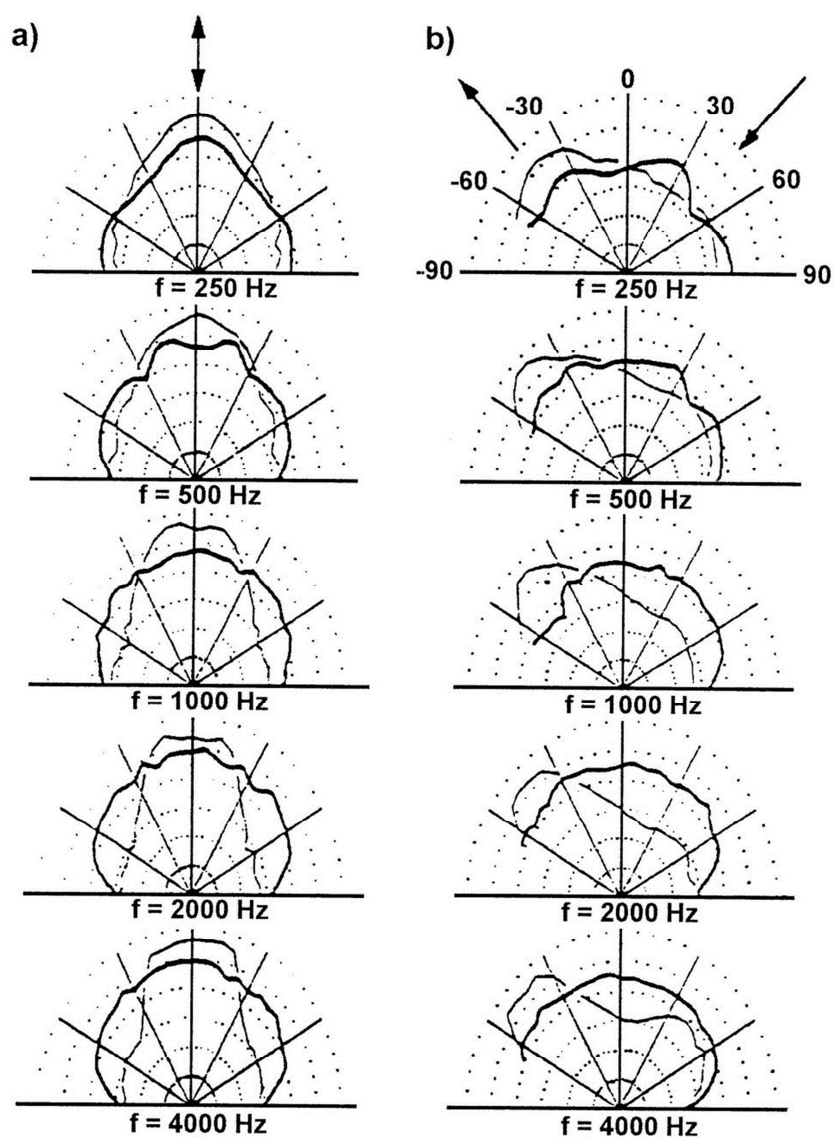
Počet hlavních směrů odrazů p je dán upraveným vztahem [1]:

$$p = \frac{2f_0Nb}{c} + 1 \quad (1.29)$$

Pro dosažení dobré účinnosti by pro kmitočet f_0 mělo existovat alespoň pět směrových laloků. S rostoucím kmitočtem počet laloků vzrůstá. [1]

Rovnoměrnost rozptylu závisí na součinu $N.b$ (obr. 19), tj. na periodě opakování jednotlivých šachet. Širokopásmového účinku se dosáhne u difuzoru s dlouhou periodou opakování velkého počtu hlubokých a úzkých šachet. [1]

Příklad směrových vyzářovacích charakteristik difuzoru RPG ve srovnání s odrazivou rovinou deskou je znázorněn na obr. 20. [1]



Obr. 20 Směrové vyzařovací charakteristiky difuzoru RPG a odrazivé desky [1]:

a) kolmý dopad zvuku

b) šikmý dopad zvuku

- difuzor RPG

- rovinná odrazivá deska

5. LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY

5.1. Základní kritéria pro uzavřené prostory

Uzavřené prostory jsou rozděleny na:

- prostory pro kulturní účely,
- prostory pro školní účely,
- prostory pro veřejné účely,
- místnosti pro snímání, poslech a zpracování zvuku,
- nevýrobní pracovní prostory. [3]

Za základní akustické požadavky pro uzavřené prostory lze považovat:

- požadavek na optimální dobu dozvuku podle účelu využití prostoru,
- požadavek na nepřekročení nejvyšší přípustné hladiny hluku pozadí v uzavřeném prostoru podle účelu jeho použití,
- požadavek na odstup hladiny hluku pozadí od hladiny provozního signálu,
- požadavek na srozumitelnost
- požadavek na rovnoměrnost rozložení hladin akustického tlaku v prostoru. [3]

Doba dozvuku

Doba dozvuku je důležitá z hlediska srozumitelnosti řeči, poslechu hudby, ale i dobré pracovní pohody. Optimální doba dozvuku uzavřeného prostoru a její závislost na kmitočtu se stanoví podle objemu a účelu místnosti. U prostorů s vyššími akustickými nároky se předepisuje kmitočtový průběh doby dozvuku v pásmu 63 Hz až 10 kHz, v ostatních případech pak obvykle pro pásmo středních kmitočtů mezi 125 Hz a 4 kHz. [1][3]

Optimální doba dozvuku T_{opt} (s) je doba, při níž zvuk v prostoru nabývá optimální poslechové kvality a řeč optimální srozumitelnosti. [2]

Hodnota optimální doby dozvuku je v ČR doporučena ČSN 73 0525 Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - všeobecné zásady, a dalšími normami s ní souvisejícími (ČSN 73 0526, ČSN 73 0527, ČSN 73 0530). [2]

Hodnotu optimální doby dozvuku T_{opt} (s) pro obsazené místnosti dle účelu využití můžeme stanovit pomocí vztahů (dle [11][2]):

- opera, hudební divadlo:

rozsah - objem $V \in \langle 600; 20\,000 \rangle \text{ m}^3$

$$T_{opt} = (0,3961 \cdot \log V) - 0,026 \quad (1.30)$$

- víceúčelový sál, zkušebna orchestru, sboru:

rozsah-objem $V \in \langle 500; 20\,000 \rangle \text{ m}^3$

$$T_{opt} = (0,3582 \cdot \log V) - 0,061 \quad (1.31)$$

- čínoherní divadlo, zkušebna činohry, posluchárna:

rozsah – objem $V \in \langle 100; 6\,000 \rangle \text{ m}^3$

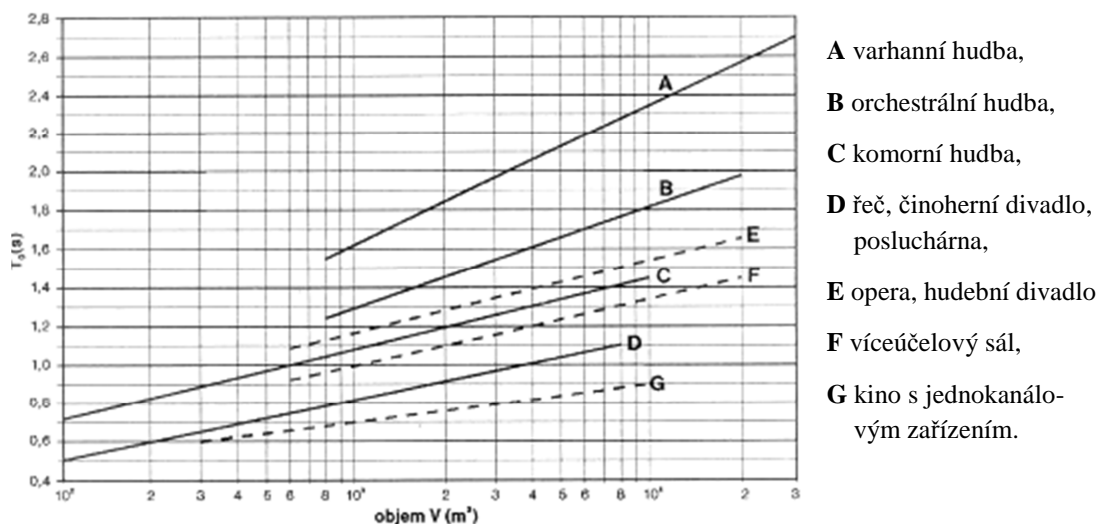
$$T_{opt} = (0,3424 \cdot \log V) - 0,185 \quad (1.32)$$

- kino s jednokanálovým zvukovým zařízením:

rozsah – objem $V \in \langle 200; 10\,000 \rangle \text{ m}^3$

$$T_{opt} = (0,1915 \cdot \log V) + 0,134 \quad (1.33)$$

Norma uvádí požadavky na objem prostoru, doporučení pro poměry jeho základních rozměrů a pro jeho tvar z hlediska možnosti vzniku rušivých akustických jevů, postup výpočtu doby dozvuku. Na obr. 21 jsou uvedeny optimální doby dozvuku v závislosti na objemu a účelu místnosti dle [3][2].



Obr. 21 Optimální doba dozvuku T_{opt} (s) v závislosti na objemu a účelu místnosti [2]

Objem uzavřeného prostoru závisí na provozních, hygienických a akustických požadavcích. Z hlediska akustiky je objem určován účelem daného prostoru, počtem posluchačů, příp. účinkujících. Doporučené objemy jsou uvedeny v normách ČSN 73 0525, 73 0526 a 73 0527.

Rozměry uzavřeného prostoru doporučuje norma ČSN 73 0525 v závislosti na jeho objemu.

Požadavky na prostory pro kulturní účely [2]

Prostor	Počet osob	Objem V (m ³) na 1 osobu	Číslo rozhraní T/T_{opt}	Poznámka
Koncertní sál:			1	$V \leq 4000 \text{ m}^3$
Varhanní hudba	-	10 až 12	1	
Symfonický orchestr	do 2000	8 až 10	1	
Komorní hudba	do 500	6 až 8		
Opera	do 1500	6 až 8	1	$V \leq 12000 \text{ m}^3$
Hudební divadlo	-	6 až 8	1	
Zkušebna orchestru, pěveckého sboru	do 250	8	1	$V \geq 2000 \text{ m}^3$
Víceúčelový sál	-	5 až 7	2	
Činoherní divadlo	do 1200	4 až 6	3	$V \leq 6000 \text{ m}^3$
Zkušebna činohry	do 50	4 až 6	3	
Přednáškový sál	do 400	4 až 5	3	$V \leq 2000 \text{ m}^3$
Kino s jednokanál. zvukový zařízením	do 400 nad 400	4 až 5 5 až 6	4	
Kino s vícekanál. zvukovým zařízením analogovým	do 400 nad 400	4 až 5 5 až 6	5	Doporučuje se hladina NC-25

Měření, resp. výpočet, doby dozvuku se provádí u prostorů s vyššími akustickými nároky v kmitočtových pásmech 63 až 10 000 Hz, u ostatních místností v pásmech od 125 až 4 000 Hz. [2]

Kmitočtový průběh vypočítané (resp. naměřené) doby dozvuku T se kontroluje ve vztahu k optimální době dozvuku T_{opt} pomocí doporučeného rozmezí poměru těchto dob, tj. T/T_{opt} , které příslušná norma uvádí. [2]

Meze přípustného rozmezí poměru dob dozvuku T/T_{opt} obsazeného prostoru daného určení [2]

Určení		Meze	Střední kmitočet f (Hz) oktávového pásma							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Hudba	horní		1,45	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	
		dolní		1,00	0,80	0,80	0,80	0,80	0,65	
2	Hudba i řeč	horní		1,45	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	
		dolní		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,65	
3	Řeč	horní		1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	
		dolní		0,65	0,80	0,80	0,80	0,80	0,65	
4	Kino jednokanálové	horní		1,55	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	
		dolní		0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,60	
5	Kino vícekanálové	horní	1,50	1,30	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		dolní	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60
6	Tělocvična, sportovní hala	horní			1,20	1,20	1,20	1,20		
		dolní			0,80	0,80	0,80	0,80		

Hluk v pozadí

Hlukem pozadí rozumíme hluk pronikající do chráněné místnosti z okolí, hluk klimatizace, nevýrobních zařízení apod. Požadavky na nejvyšší přípustné hladiny hluku pozadí jsou uvedeny v příslušných normách. Požadavky na dobu dozvuku a přípustné hladiny hluku pozadí pro prostory různého provozního zařízení jsou uvedeny v NV č. 272/2011 Sb., ČSN 73 0525, ČSN 73 0526, ČSN 73 0527. [1][2][3]

Srozumitelnost

Při přenosu řečových signálů nás zajímá především srozumitelnost v místě posluchače. Srozumitelnost závisí na době dozvuku, objemu prostoru, vzdálenosti zdroje a na odstupu hladiny řeči od hluku pozadí. [1][3]

Srozumitelnost lze posuzovat na základě několika metod. Jednou z těchto metod je *ztráta srozumitelnosti*.

Ztráta srozumitelnosti souhlásek (ZSS) je v přímé souvislosti s celkovou ztrátou srozumitelnosti. Pro ztrátu srozumitelnosti souhlásek platí za předpokladu, že odstup signálu od hluku pozadí je < 25 dB:

$$ZSS = \frac{200T^2 D^2 N}{VQ} \quad (-) \quad (1.34)$$

kde T je doba dozvuku

D vzdálenost mezi zdrojem a místem příjmu v m,

- V objem prostoru v m³,
 Q činitel směrovosti vysílače,
 N počet zdrojů. [1]

Další metodou je *metoda slabikové srozumitelnosti*. Tato metoda se zjišťuje nadiktováním trojice slabik vyskytujících se v daném jazyku (bezesmyslové logatomy), které zapisují posluchači. Ti se střídají na jednotlivých místech, aby byl vyloučen subjektivní faktor. Procentuální vyjádření správně zapsaných slabik k celkovému počtu nadiktovaných představuje slabikovou srozumitelnost. Je definována vztahem [12]:

$$SZ = 96 \cdot K_r \cdot K_d \cdot K_h \cdot K_t \quad (\%) \quad (1.35)$$

kde 96 je procento, které vychází z toho, že slabiková srozumitelnost nemůže být ani za ideálních podmínek větší, než 96%,

- K_r činitel slabikové srozumitelnosti závislý na hladině intenzity řeči L_r (dB)
 K_d činitel slabikové srozumitelnosti závislý na době dozvuku T (s)
 K_h činitel slabikové srozumitelnosti závislý na poměru hladiny intenzity zvuku v uzavřeném prostoru k hladině intenzity řeči L_r v daném místě,
 K_t činitel slabikové srozumitelnosti závislý na tvaru uzavřeného prostoru.

V difúzním poli malých místností je $K_t = 1$, v malých místnostech se zakřivenými povrchy stropu a stěn je $K_t = 0,9$, v ostatních prostorách s oblými povrchy je $K_t = (1,06) 0,95$ až $0,90$. [12]

Rovnoměrnost rozložení hladin akustického tlaku v prostoru

Akustické vlastnosti uzavřených prostorů se liší podle velikosti, tvaru a pohltivosti. Tvar prostorů musí být řešen tak, aby umožňoval optimální rozložení zvukové energie. U malých pravoúhlých místností se obvykle tvar stanoví podle vhodných poměrů délek jednotlivých stran. Tvarové řešení velkých prostorů se liší podle účelu jejich využití a ověřuje se grafickými nebo modelovými metodami (viz kap. 3.1.). [1]

Určení rozměru a tvaru prostoru

a) Malé místnosti

U místností menších objemů (do 200 m³) je třeba vhodným poměrem jednotlivých rozměrů dosáhnout rovnoměrného rozložení vlastních kmitů místnosti. Hustota kmitů

v třetinooktávových pásmech by měla s kmitočtem rovnoměrně narůstat, nebo by se u sousedních pásem neměla lišit. [1][3]

Doporučované poměry stran jsou:

- délka : šířka = 1,25 ... 1,45;
- šířka : výška = 1,1 ... 1,9;
- délka : výška $\leq 1,9$ nebo $\geq 2,1$.

V praxi jsou však bohužel ve většině případů rozměry místností určeny stavebním řešením.

Hustotu vlastních kmitů n v určitém kmitočtovém pásmu Δf můžeme určit přesně ze součtu vlastních kmitů. Teoreticky lze hustotu vlastních kmitů vypočítat z následujícího vzorce [1]:

$$n = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{L}{8c} \quad (\text{Hz}^{-1}) \quad (1.36)$$

kde	l_x, l_y, l_z	jsou	rozměry místnosti v m,
	$V = l_x \cdot l_y \cdot l_z$		objem místnosti v m^3 ,
	$S = 2(l_x l_y + l_y l_z + l_z l_x)$		celková plocha místnosti v m^2 ,
	$L = 4(l_x + l_y + l_z)$		celková délka hran v m
	f		střední kmitočet uvažovaného pásma v Hz,
	c		rychlost šíření zvuku $c = 340 \text{ m.s}^{-1}$. [1]

Počet vlastních kmitů v pásmu o šířce Δf se středním kmitočtem f je pak dán vztahem

$$K = n \cdot \Delta f \quad (1.37)$$

b) Velké prostory

U velkých prostorů je hustota vlastních kmitů vzhledem k rozměrům prostoru dostatečně velká, je však třeba vhodným tvarováním stěn a stropu dosáhnout cílených akustických parametrů (řeč, hudba). Rozhodující je především půdorysný tvar prostoru. Ten může být buď pravoúhlý, nebo nepravidelný, přičemž každé uspořádání má své výhody i nedostatky. Z hlediska rovnoměrného rozložení akustické energie se zejména u hudebních sálů klade důraz na bohatství bočních odrazů. [1][2]

Dalším požadavkem, který je nutné splnit u velkých prostorů, je vyrovnání hladin akustického tlaku ve vzdálených místech. Toho se dosáhne vhodným směřováním zdrojů zvuku, přičemž se využívá zákonů geometrické akustiky. Tyto analogie platí přibližně za předpokladu, že velikost odrazných ploch je větší než vlnová délka u dopadajícího zvukového paprsku. Na základě těchto skutečností jsou vytvořeny různé matematické konstrukce pro řešení tvaru místností. [1]

5.2. Akustické parametry materiálů pro aplikaci v prostorové akustice

Schopnost materiálu nebo konstrukce pohlcovat zvuk je charakteristickým činitelem zvukové pohltivosti. Činitel zvukové pohltivosti je vyjádřen jako poměr zvukové energie W_a pohlcené plochou ke zvukové energii W_i , dopadající na plochu, Vyjadřujeme jej zlomkem

$$\alpha = W_a/W_i \quad (1.38)$$

přičemž pohlcená energie $W_a = W_i - W_r$, kde W_r je odražená složka zvukové energie. [1]

U některých výrobků není určena hodnota činitele zvukové pohltivosti, nýbrž ekvivalentní pohltivá plocha povrchů, která je dána vztahem

$$A = \sum A_i \cdot S_i \quad (\text{m}^2) \quad (1.39)$$

kde S_i je plocha i-tého materiálu v m^2 ,

a_i činitel zvukové pohltivosti i-tého materiálu. [1]

Hodnoty a , popřípadě A , jsou uvedeny pro oktavové intervaly v kmitočtech 125 Hz do 4000 Hz, eventuálně 8000 Hz.

Pro orientační informaci o zvukové pohltivosti materiálů se v praxi používá střední hodnota činitele pohltivosti, zjištěná jako průměr z hodnot přiřazených ke kmitočtům (250, 500, 1000 a 2000) Hz. [1]

Materiály jsou rozděleny do šesti základních skupin:

1. Konstrukční stavební a porézní materiály
2. Materiály pro úpravu stěn
3. Materiály pro úpravu stropů

4. Akustická tělesa
5. Užitkové pohlcovače
6. Rozptylové prvky

Prvek	Činitel zvukové pohltivosti α_s v oktávových pásmech, střední kmitočet v Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Beton, omítnuté cihly	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Cihlové zdivo, neomítnuté	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Tvrdé podlahové krytiny (PVC, parkety) na těžké podlaze	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Měkká podlahová krytina na těžké podlaze; ≤ 5 mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,30	0,40
Měkká podlahová krytina na těžké podlaze; ≥ 10 mm	0,04	0,08	0,15	0,30	0,45	0,55
Dřevěná podlaha, parkety na prknech	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Okna, prosklená fasáda	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Dveře (dřevěné)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Záclony; 0 mm až 200 mm před tvrdým povrchem ¹⁾	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Závěs, $< 0,2 \text{ kg/m}^2$; 0 mm až 200 mm před tvrdým povrchem; typické minimum ^a	0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,22
Závěs, tkaný materiál $\approx 0,4 \text{ kg/m}^2$; skládaný nebo řasený $> 1 : 3$, 0 mm až 200 mm před tvrdým povrchem	0,10	0,40	0,70	0,90	0,95	1,00
Velké otvory (nejmenší rozměr > 1 m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mřížka, 50 % otevřené plochy	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
¹⁾ Před oknem hodnoty kombinace mohou vzrůst k hodnotám tohoto samotného okna. POZNÁMKA Tyto údaje jsou z publikací používaných v Rakousku, Dánsku a Nizozemí.						

Obr. 22 Typické hodnoty činitele zvukové pohltivosti dle ČSN 12354-6 [4]

6. CHARAKTERISTIKA POČÍTANÉHO PROSTORU, CÍL VÝPOČTU

6.1. Popis uvažovaného prostoru

Hudební klub *Metro* se nachází v prostorách olomouckých klenbových sklepů, pocházejících ze 14. století, přičemž jako hudební klub tyto prostory slouží od roku 1991. Jsou zde pořádány akce zejména elektronické hudby. Kapacita klubu je 120 osob.

Klub se skládá ze 3 hlavních prostor (tzv. bar, vagón a chillout), které jsou vzájemně propojeny spojovacími chodbami. Stěny klubu jsou kamenné, omítnuté vápennocementovou omítkou, do 2 m výšky neomítnuté se spárovaným kamenným zdivem. Kromě chilloutu jsou v celém klubu klenbové stropy s průměrnou výškou 2,8 metru. V chilloutu je strop tvořen průvlakem a nosnými trámy. Klub je koncipován v jedné výškové úrovni -3,200 m, pouze chillout je zvýšen třemi schody do úrovně -2,800 m. Nášlapná vrstva podlahy je v celém prostoru řešena kobercem. V hlavním sálu (bar) se nachází zděný bar s dřevěnou barovou deskou. V této části klubu je zbudováno malé pódium, které je taktéž postaveno z kamenného zdiva. Menší bar je zbudován i v části zvané vagón. Chillout slouží k sezení, jsou zde proto po obvodu zdi umístěny sedačky.



Obr. 23 Hlavní sál – bar [autor]



Obr. 24 Hlavní sál - pohled na pódium [autor]



Obr. 25 Průhled druhou místností – vagónem [autor]



Obr. 26 Třetí část klubu – tzv. chillout [autor]



Obr. 27 Komunikační prostory spojující dílčí části klubu [autor]

6.2. Měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku proběhlo ve spolupráci s vedoucí této práce dne 29. září 2013 od 16 hodin do 18 hodin. K měření byly použity následující přístroje Brüel & Kjaer:

Použité přístroje

- Přesný modulární analyzátor zvuku typ 2260 Investigator,
ČSN IEC 651 třída přesnosti 1,
ČSN IEC 60804 třída přesnosti 1,
ČSN IEC 61260 (části normy) třída přesnosti 1,
Ověřovací list č. 6035-OL-Z0026-12, platnost do 26.3.2014

- Měřicí předpolarizovaný ½" mikrofon typ 4189
Mikrofon splňuje požadavky normy PNÚ 1802.1, 1802.2
Ověřovací list č. 6035-OL-M0028-12, platnost do 22.3.2014,
výrobní číslo 2343360
- Hladinový zvukový kalibrátor typ 4231,
ČSN IEC 942, třída přesnosti 1,
Kalibrační list č. 6035-KL-K049-09
Kalibrační list č. 6035-KL-K0013-12
- Startovací pistole ZORAKI Mod. 914 průměru 9 mm.

Všechny přístroje ověřil český metrologický institut, Oblastní inspektorát – laboratoř akustiky, Okružní 31, Brno.

Metoda měření

Měření doby dozvuku bylo prováděno dle ČSN ISO 3382-2, únor 2009. Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech (ČSN 73 0534).

Pro měření byla zvolena metoda integrované impulsové odezvy. Impulsová odezva byla získána pomocí startovací pistole ZORAKI Mod. 914 průměru 9 mm. Měření doby dozvuku bylo provedeno v 1/3 oktávových pásmech ve frekvenčním rozsahu 50 Hz až 10 000 Hz. Mikrofon byl umístěn ve výšce 1,2 m nad podlahou.

Při měření byly polohy mikrofonu voleny tak, aby došlo k optimálnímu pokrytí celého prostoru a byly splněny následující požadavky:

- Minimální vzdálenost jednotlivých poloh mikrofonu volena 1,5 m,
- Vzdálenost od kterékoliv polohy mikrofonu k nejbližšímu odrazivému povrchu, včetně podlahy byla větší jak čtvrtina vlnové délky tj. normálně kolem 1 m.

Rozložení poloh mikrofonu bylo voleno tak, aby předvídalo hlavní vlivy, které pravděpodobně způsobí rozdíly doby dozvuku v prostorách. Počet poloh mikrofonu bylo 11, počet poloh zdrojů hluku byly 3.

Seznam jednotlivých poloh zdroje hluku (Z1-Z3) a jednotlivých poloh mikrofonu (P1-P11):

- Z1: P1, P2, P3
- Z2: P2, P4, P5, P6
- Z3: P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11

Všechny hladiny hluku jsou vztaženy k referenčnímu akustickému tlaku 20 µPa. Kalibrace celé měřicí sestavy před a po měření byla provedena pomocí hladinového zvukového kalibrátoru s hladinou akustického tlaku 94,0 dB o kmitočtu 1000 Hz.

Záznam a zpracování akustického signálu bylo realizováno standardním způsobem, kdy byl využit dvoukanálový analyzátor Brüel & Kjaer typ 2260 a signál byl ihned kmitočtově analyzován. Výsledky měření hluku jsou vyjádřeny ve formě třetinooktávových spekter akustického tlaku. Častová charakteristika „Fast“.

6.3. Legislativní požadavky

Dle ČSN 73 0527 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely má být dosaženo doporučené optimální doby dozvuku T_0 (s) pro oktávová pásma se středními kmitočty od 125 Hz do 4 000 Hz.

Účelem vhodné akustické úpravy hudebního klubu je dosažení doby dozvuku T (s) takové, aby závislost hodnot T/T_0 (-) na středních kmitočtových pásmech vyhovovala přípustnému rozmezí těchto hodnot.

Stanovení optimální doby dozvuku dle vztahu:

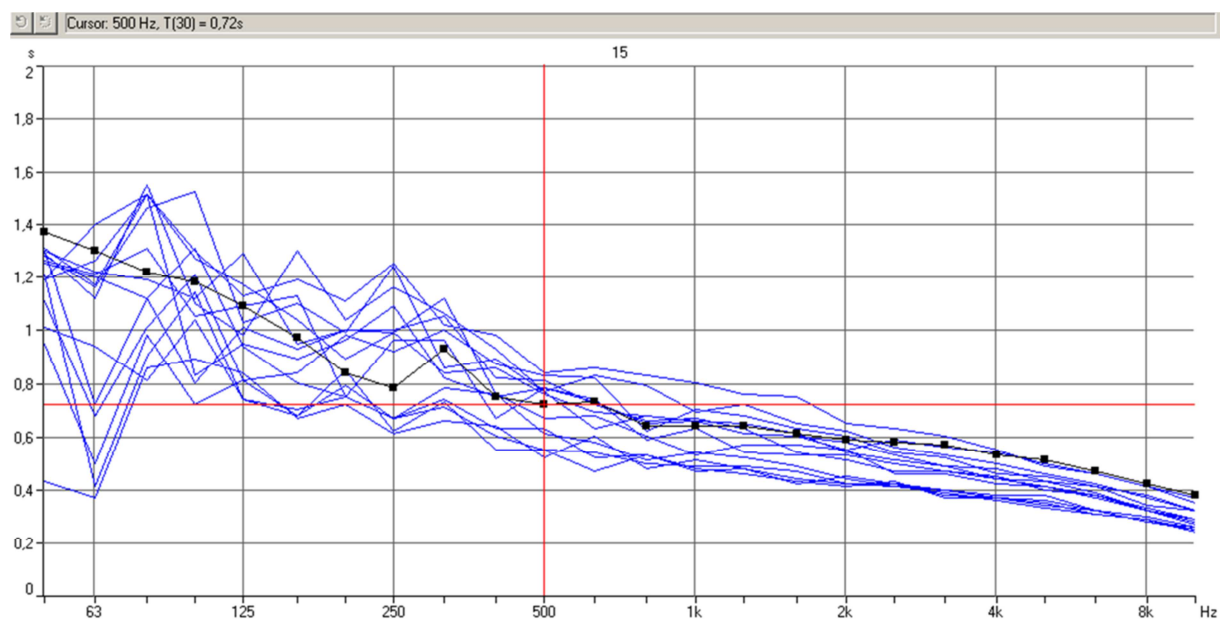
$$T_0 = (0,358 \cdot \log V) - 0,061 = (0,358 \cdot \log 243) - 0,061 = 0,63 \text{ s}$$

6.4. Naměřené hodnoty

Průměrná hodnota doby dozvuku v 1/3 oktávových pásmech a nejistota průměrné doby dozvuku v místnosti stanovená směrodatnou odchylkou v souladu s ČSN EN ISO 3382-2 je uvedena v tabulce. Z průběhu měřené doby dozvuku je zřejmé, že problémovými 1/3 oktávovými oblastmi jsou pásma se středy 125 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz a 4000 Hz.

f (Hz)	Průměrná T30 (s)	odchylka (s)
125	1,00	0,15
250	0,94	0,21
500	0,72	0,10
1000	0,62	0,09
2000	0,54	0,07
4000	0,45	0,06

Průměrná měřená doba dozvuku T v 1/3 oktávových pásmech



Kmitočtová charakteristika měřených prostor

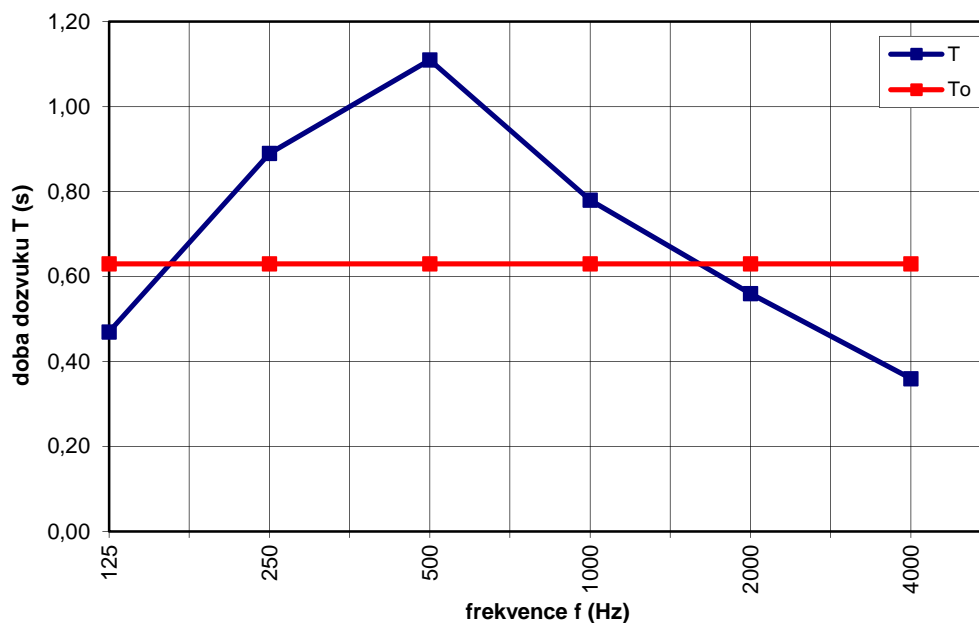
7. MODELOVÁNÍ ZVUKOVÝCH ZDROJŮ

7.1. Výstupy z programu Odeon

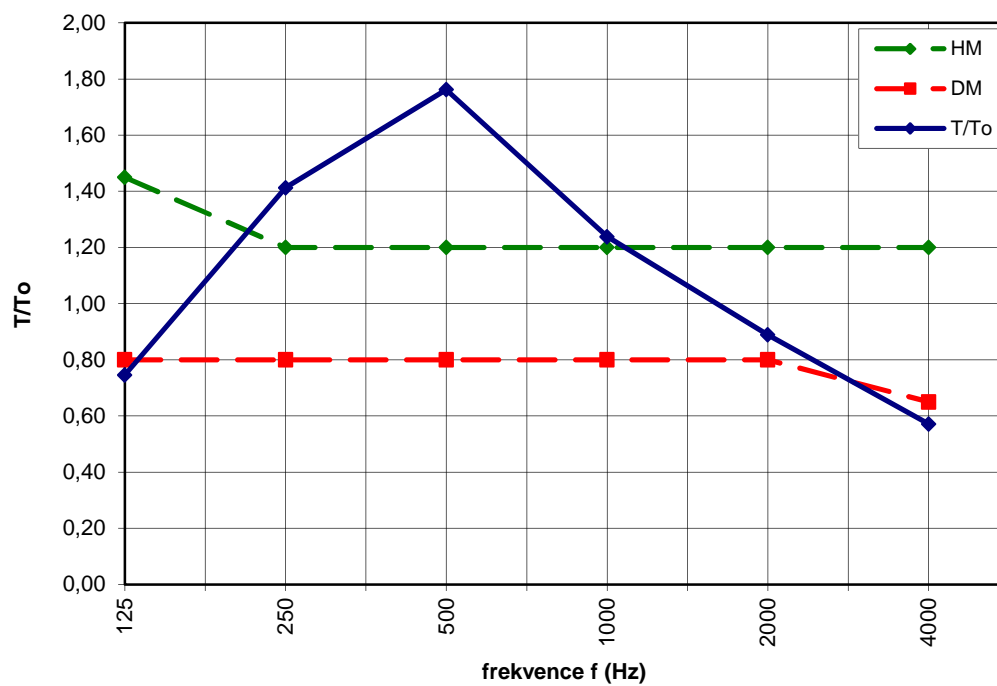
Z důvodů značné členitosti posuzovaného prostoru byl model zjednodušen a posuzovány byly 3 zdroje hluku a 3 přijímače – vždy jeden přijímač s jedním vysílačem v každé ze tří dílčích částí. Z tohoto důvodu se výsledky liší oproti celkovým zprůměrovaným hodnotám, získaným při měření. Výsledky simulované programem Odeon jsou tedy přesnější z hlediska akustických úprav v jednotlivých částech, navrhované úpravy proto vychází z těchto výsledků.

Hlavní sál – bar

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
průměrná T30 (s)	0,47	0,89	1,11	0,78	0,56	0,36



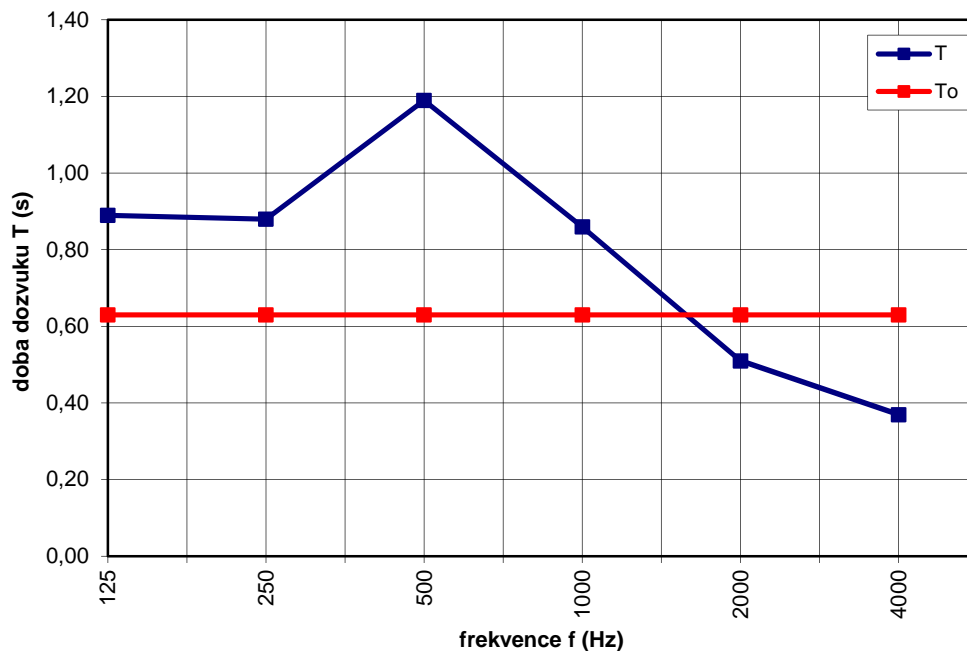
Znázornění skutečné (T) a optimální (T_o) doby dozvuku – stávající stav [autor]



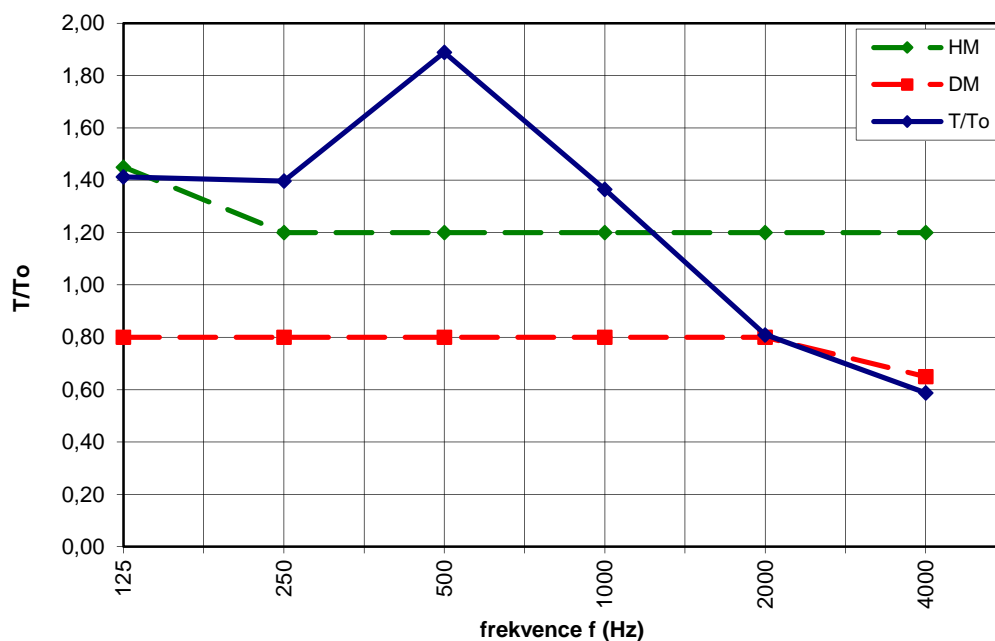
Znázornění doby dozvuku (T) vzhledem k normovým mezím (HM – horní mez, DM – dolní mez) – stávající stav [autor]

Vedlejší bar - vagón

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
průměrná T30 (s)	0,89	0,88	1,19	0,86	0,51	0,37



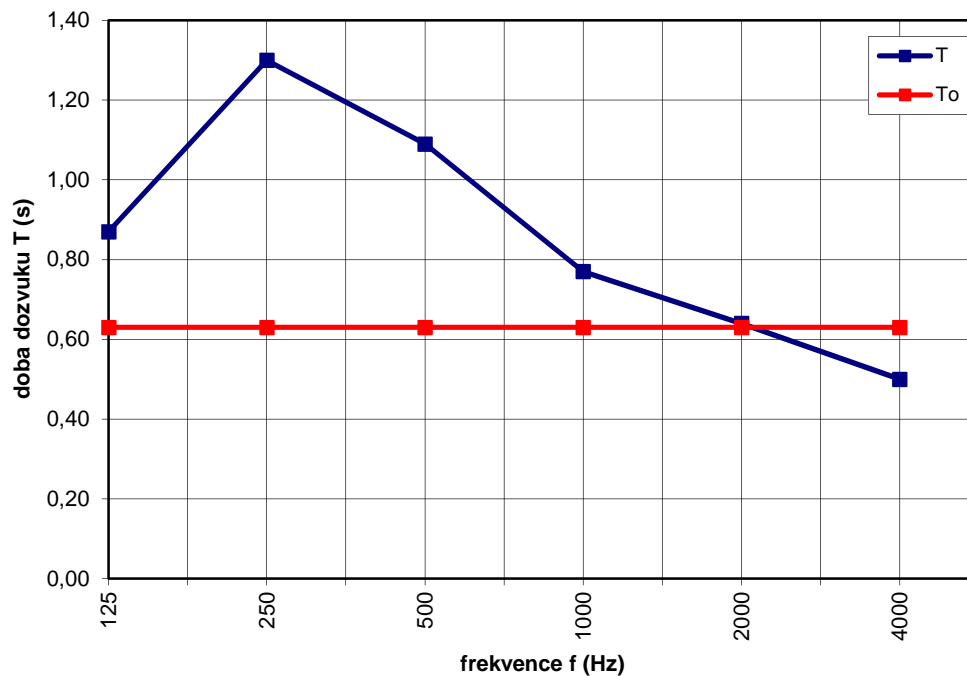
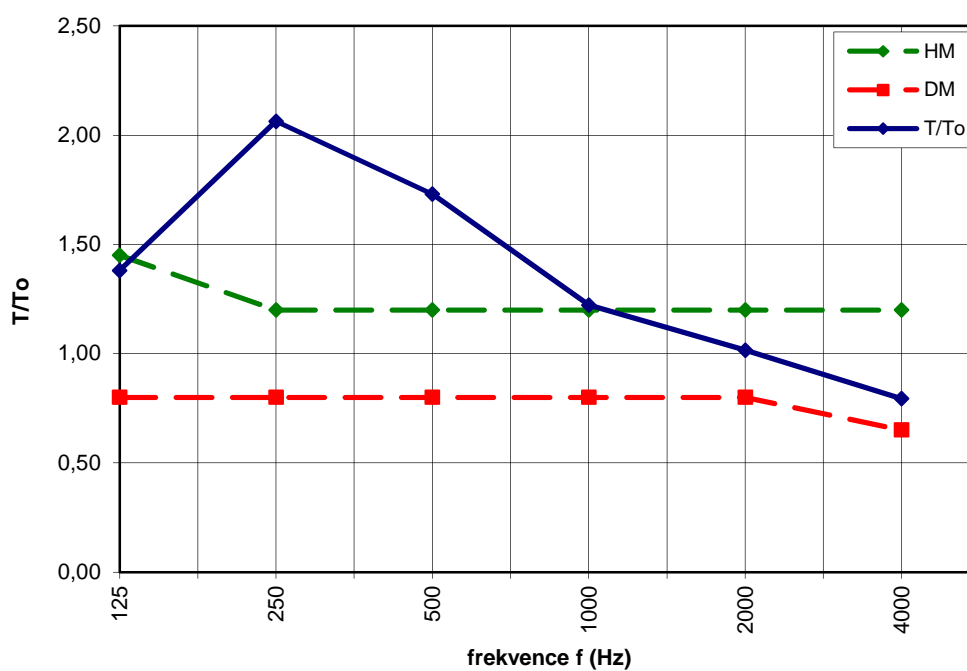
Znázornění skutečné (T) a optimální (T₀) doby dozvuku – stávající stav [autor]



Znázornění doby dozvuku (T) vzhledem k normovým mezím (HM – horní mez, DM – dolní mez) – stávající stav [autor]

Místnost pro sezení - chillout

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
průměrná T30 (s)	0,87	1,30	1,09	0,77	0,64	0,50

*Znázornění skutečné (T) a optimální (To) doby dozvuku – stávající stav [autor]**Znázornění doby dozvuku (T) vzhledem k normovým mezím (HM – horní mez, DM – dolní mez) – stávající stav [autor]*

7.2. Návrh akustických úprav

Na základě výsledků z modelované doby dozvuku a požadavků na optimální dobu dozvuku byly navrženy tyto akustické úpravy:

Hlavní sál – bar

- obklad sádrokartonovými deskami SDK Knauf 8/15/20 – děrovaná deska D127 s podílem děrování 5,2%
- odsazení od stěny $d = 60 \text{ mm}$
- ve vzduchové mezeře bude vložena minerální deska tl. 20 mm
- $m' = 0,4 \text{ kg.m}^{-2}$
- celková plocha obkladu 12 m^2

Vedlejší bar - vagón

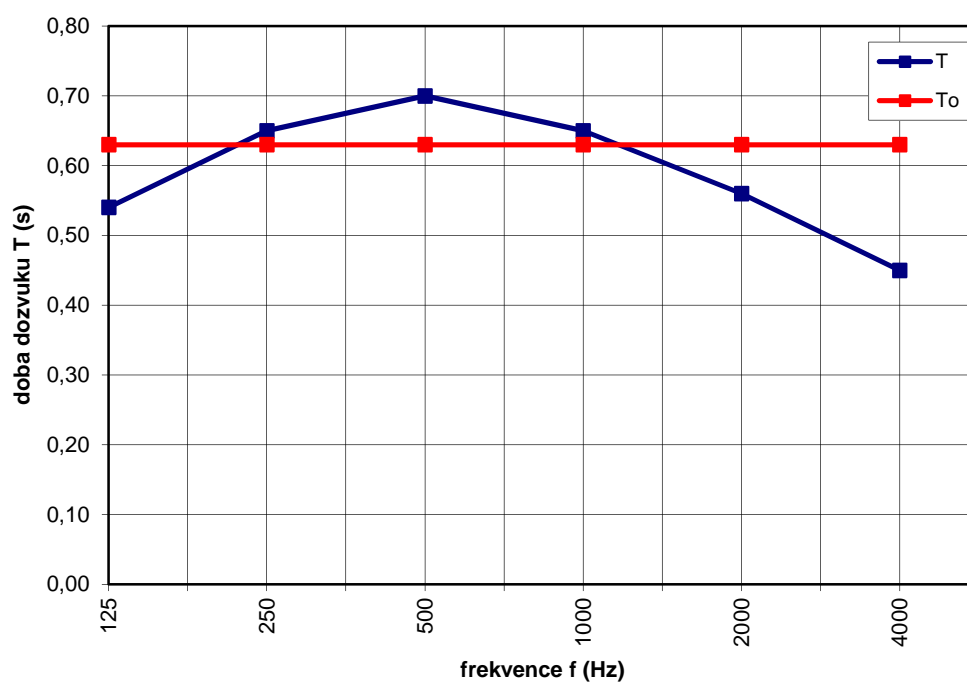
- obklad sádrokartonovými deskami SDK Knauf 8/15/20 – děrovaná deska D127 s podílem děrování 5,2%
- odsazení od stěny $d = 60 \text{ mm}$
- ve vzduchové mezeře bude vložena minerální deska tl. 20 mm
- $m' = 0,4 \text{ kg.m}^{-2}$
- celková plocha obkladu 12 m^2

Místnost pro sezení - chillout

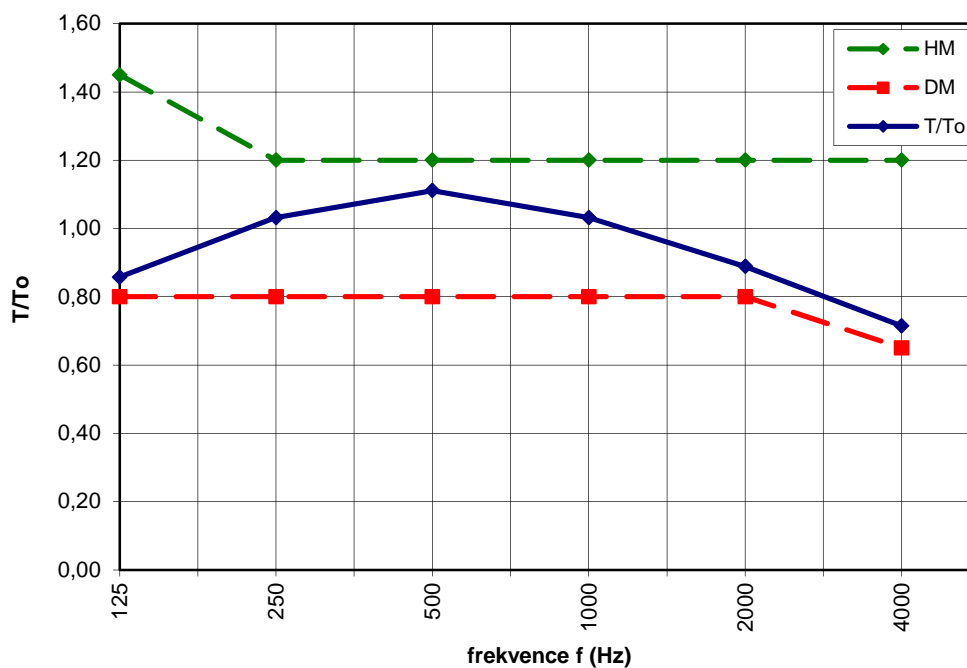
- obklad sádrokartonovými deskami SDK Knauf 8/18 – děrovaná deska D127 s podílem děrování 15,5%
- odsazení od stěny $d = 60 \text{ mm}$
- $m' = 0,4 \text{ kg.m}^{-2}$
- celková plocha obkladu 10 m^2

7.3. Zhodnocení akustických úprav

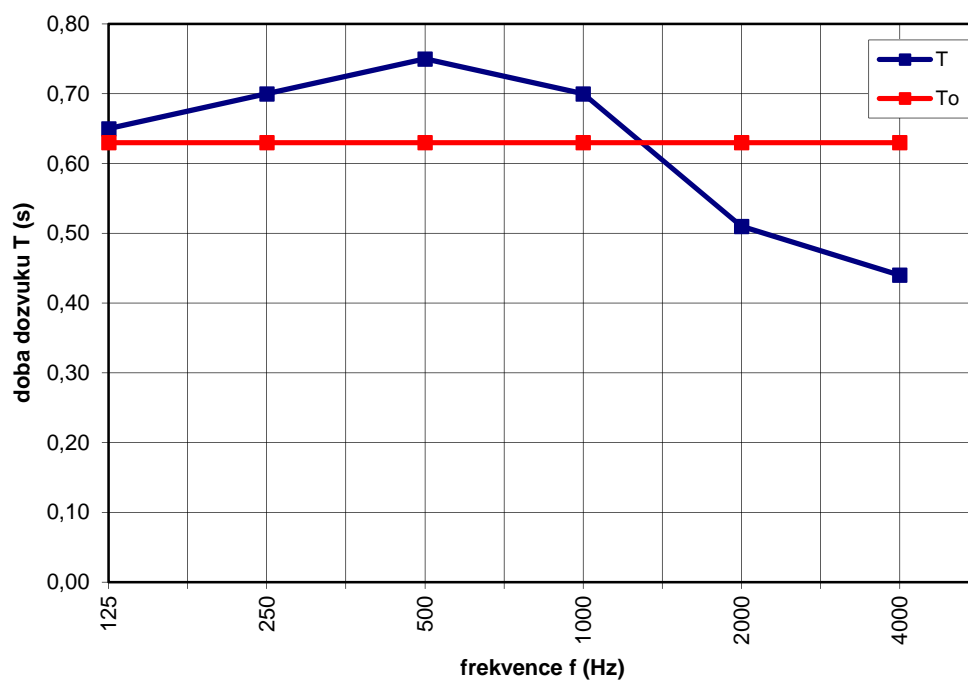
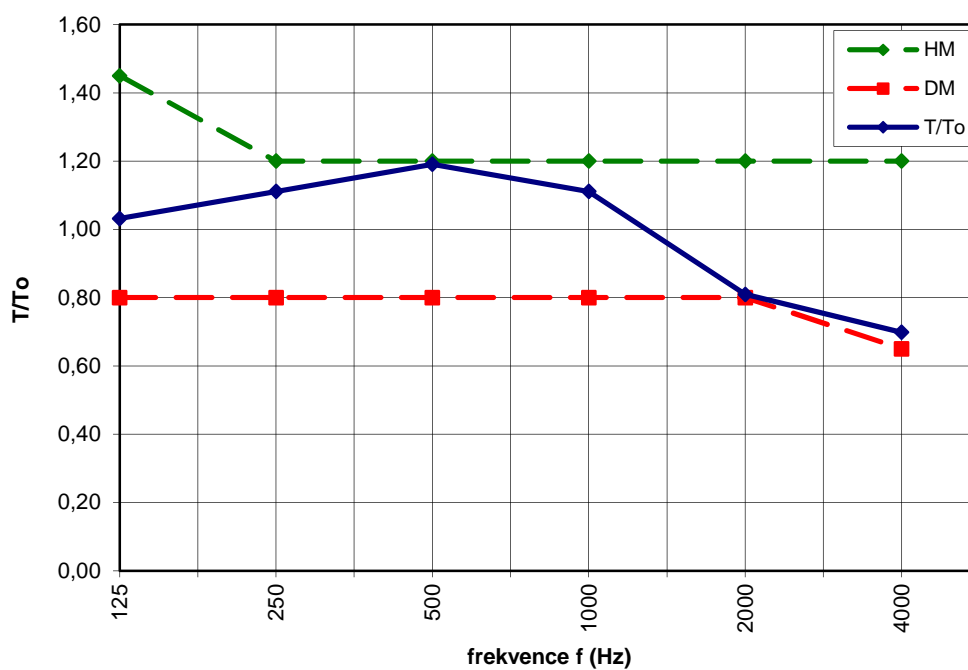
Hlavní sál – bar

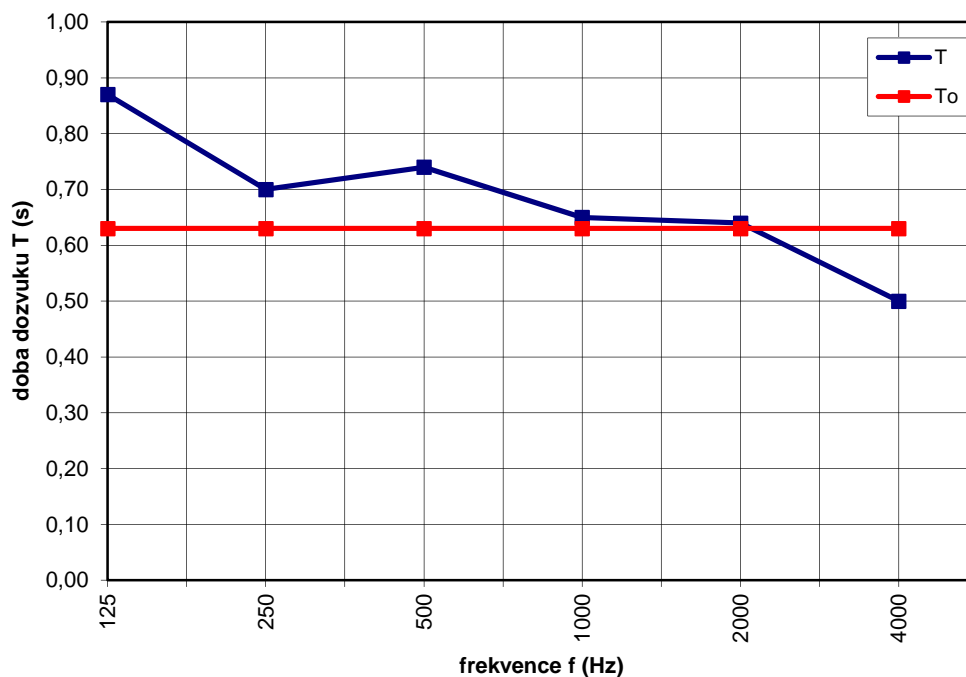
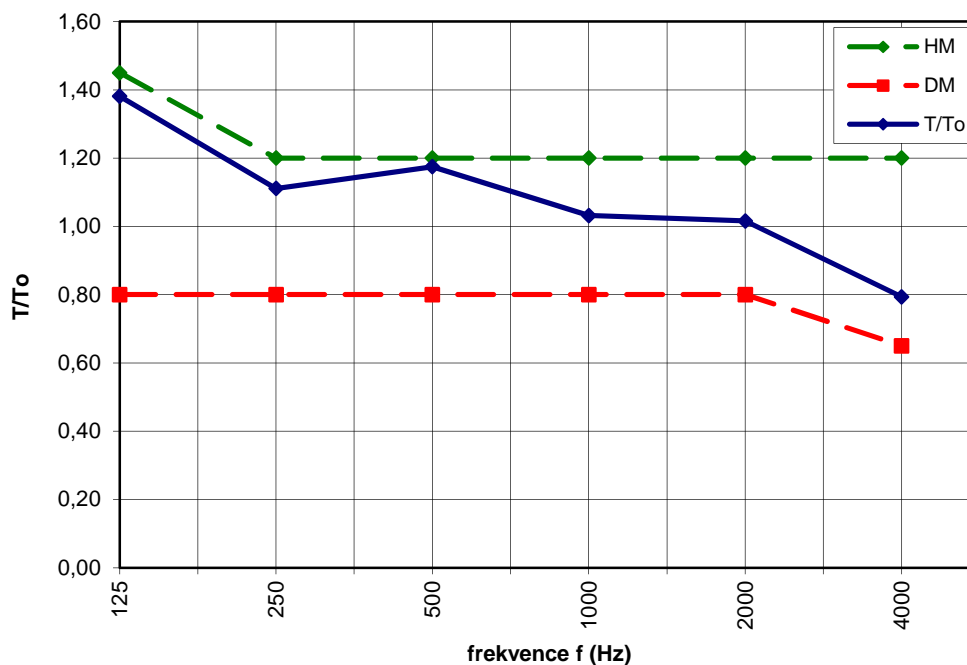


Znázornění skutečné (T) a optimální (T_0) doby dozvuku – nový stav [autor]



Znázornění doby dozvuku (T) vzhledem k normovým mezím (HM – horní mez, DM – dolní mez) – nový stav [autor]

Vedlejší bar - vagón*Znázornění skutečné (T) a optimální (T_o) doby dozvuku – nový stav [autor]**Znázornění doby dozvuku (T) vzhledem k normovým mezím (HM – horní mez, DM – dolní mez) – nový stav [autor]*

Místnost pro sezení - chillout*Znázornění skutečné (T) a optimální (T_0) doby dozvuku – nový stav [autor]**Znázornění doby dozvuku (T) vzhledem k normovým mezím (HM – horní mez, DM – dolní mez) – nový stav [autor]*

Na základě předchozích grafů lze konstatovat, že navrhovanou úpravou bude docíleno optimální doby dozvuku.

8. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout vhodné akustické opatření pro zlepšení akustických poměrů hudebního klubu Metro v Olomouci. Na základě změřené doby dozvuku těchto prostor a jejím následném vyhodnocení jako nevyhovující byl proveden návrh vhodných akustických úprav ve snaze zlepšit poslechovou kvalitu hudby a mluveného slova.

Návrh byl proveden formou 3D modelu v programu SketchUp, který byl následně importován do programu ODEON Room Acoustics, kde byl dále upravován.

Návrh byl proveden podle pokynů a požadavků příslušné platné legislativy, tak aby bylo dosaženo optimálních hodnot sledovaných kritérií. Při návrhu byly zohledněny požadavky akustické, požárně bezpečnostní, hygienické i požadavky estetické. V rámci návrhu byla sledována zejména doba dozvuku. Cílem bylo v rámci možností dosáhnout její, pokud možno, co nejoptimálnější hodnoty.

Při porovnání výsledků s požadavky současné platné legislativy a doporučenými hodnotami v rámci místní i světové odborné literatury lze dojít k závěru, že se podařilo zlepšit akustické poměry a celkovou poslechovou kvalitu posuzovaných prostor pro uvažované účely - poslech mluveného slova a hudby.

Při interpretaci výsledků je však nutné mít na paměti, že cílem bylo provést taková opatření, která by nevyžadovala nákladné, zásadní a komplexní zásahy do konstrukcí a geometrie sálu. Z toho důvodu nelze očekávat hodnoty sledovaných kritérií v naprosto ideálních rozmezích. Přesto se však podařilo na tyto optimální hodnoty dosáhnout, nebo se jim alespoň velmi přiblížit při minimálních zásazích do konstrukcí, geometrie a celkového rázu klubu.

Hudební klub tedy po navrhovaných úpravách splňuje požadavky příslušné legislativy na hodnoty doby dozvuku. U sledovaných nezávazných kritérií se podařilo dosáhnout doporučovaných hodnot, nebo se jim alespoň přiblížit.

Výsledkem je tedy celkové zlepšení poslechových kvalit hudebního klubu, které vedou k mnohem příjemnějšímu využívání těchto prostor.

9. SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy

Příloha č. 1 – Půdorysy stávajícího stavu

Příloha č. 2 – Fotodokumentace původního stavu

Příloha č. 3 – Technické listy Knauf SDK

Příloha č. 4 – Rozmístění zdrojů hluku a přijímačů v modelu

9. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
T	Doba dozvuku	(s)
T_0	Optimální doba dozvuku	(s)
T_{20}	Doba dozvuku určena z 20 dB poklesu	(s)
T_{30}	Doba dozvuku určena z 30 dB poklesu	(s)
f	Frekvence, kmitočet	(Hz)
V	Objem místnosti	(m^3)
S	Plocha povrchů	(m^2)
S_i	Plocha i-tého povrchu	(m^2)
α	Činitel zvukové pohltivosti	(-)
α_i	Činitel zvukové pohltivosti i-tého povrchu	(-)
α_E	Eyringův činitel zvukové pohltivosti	(-)
$\alpha_{stř}$	Střední činitel zvukové pohltivosti	(-)
m	Činitel útlumu zvuku ve vzduchu	(m^{-1})
A	Ekvivalentní pohltivá plocha	(m^2)
A_{obj}	Ekvivalentní pohltivá plocha objektu	(m^2)
ϕ_{ai}	Výpočtová relativní vlhkost vnitřního vzduchu	(%)
c_0	Rychlost šíření zvuku ve vzduchu	($m \cdot s^{-1}$)
EDT	Počáteční doba dozvuku (Early Decay Time)	(s)
BR	Míra hlubokých tónů (Bass ratio)	(-)
C_{50}	Míra zřetelnosti	(dB)
C_{80}	Míra jasnosti	(dB)
G	Síla zvuku (Strenght of arriving energy)	(dB)
D_{50}	Zřetelnost (Objective clarity)	(%)
t_s	Čas těžiště (Center time)	(ms)
STI, I	Index srozumitelnosti řeči (Speech Transmission Index)	(-)
SPL	Hladina akustického tlaku (Sound Pressure Level)	(dB)
I_{dop}	Intenzita dopadajícího paprsku	($W \cdot m^{-2}$)
I_{odr}	Intenzita odraženého paprsku	($W \cdot m^{-2}$)
I_{pohl}	Intenzita pohlceného paprsku	($W \cdot m^{-2}$)
p(t)	Impulsová odezva	μPa

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Použité zdroje

- [1] Vaverka, J., Kozel, V., Ládyš, L., Liberko, M., Chybík, J. *Stavební fyzika 1 – urbanistická, stavební a prostorová akustika*. Nakladatelství VUTUM, Brno, 1998
- [2] Donaťáková, Dagmar. *Stavební akustika a denní osvětlení*. VUT, Brno, 2010
- [3] ČSN 73 0525 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. ČNI Praha, 1998
- [4] ČSN EN 12354-6:2004 *Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků*. ČNI Praha, 2004
- [5] ČSN EN ISO 3382-1 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1 : Prostory pro přednes hudby a řeči*. ČNI Praha, 2009
- [6] ČSN EN ISO 3382-2 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2 : Doba dozvuku v běžných prostorech*. ČNI Praha, 2009
- [7] Hrůza, Vojtěch. *Rekonstrukce kulturně-vzdělávacího centra : diplomová práce*. VUT, Brno, 2013
- [8] Klinkovský, Václav. *Výpočet hluku ve výrobních halách : diplomová práce*. VUT, Brno, 1984
- [9] Lukašík, L., Polehradský, M., Božek, V., Čupr, K. *Stavební tepelná technika, akustika a denní osvětlení budov – Akustika a denní osvětlení v pozemním stavitelství*. Ediční středisko VUT Brno, 1985
- [10] Čechura, J. *Stavební fyzika 10 – Akustika stavebních konstrukcí*. ČVUT Praha, 1997
- [11] ČSN 73 0527:2005 *Akustika – projektování v oboru prostorové akustiky – prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. ČNI Praha, 2005
- [12] Tomašovič, P., Rychtáriková, M., Dlhý, D., Gašparovičová, V. *Akustika budov – Priestorová akustika*. STU Bratislava, 2010